

01 - 006

LEHRSTUHL MASSIVBAU
TECHNISCHE HOCHSCHULE MÜNCHEN

05-0607.001

Lehrstuhl und Institut für Massivbau
Technische Hochschule München

8 München 2, den 8. September 1970

Arcisstraße 21

Telefon: 28 60 17, 21 05-421 u. 422

Telex: 05 / 228 54

Nr. 2344/Ja/K

An das
Ministerium für Wohnungsbau und
öffentliche Arbeiten des Landes
Nordrhein-Westfalen

4 Düsseldorf 1
Karltor 8

Einfluß der Konsistenz und der Dauerlast auf das
Verbundverhalten von Stahl in Leichtbeton

BIBLIOTHEK
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
D-3300 Braunschweig

Der Bericht darf nur ungekürzt veröffentlicht werden.
Die gekürzte oder auszugsweise Veröffentlichung bedarf
der vorherigen Genehmigung des Lehrstuhls für Massivbau.

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. Einführung	1
2. Versuchsprogramm und Versuchskörper	2
3. Versuchsmaterial	5
3.1 Beton	5
3.1.1 Leichtbeton	5
3.1.2 Normalbeton	6
3.2 Bewehrungsstahl	7
4. Versuchsdurchführung	8
5. Grundlagen für die Auswertung und Deutung der Versuchsergebnisse	8
6. Versuchsergebnisse	9
6.1 Einfluß der Bewehrung zur Betonierrichtung - Lage NL u. G	10
6.1.1 LB 300 - Mischungen E 1, E 2, E 3	10
6.1.2 Normalbeton - Mischungen N 1, N 2, N 3	11
6.1.3 Vergleich des Normalbetons mit dem Leichtbeton	12
6.2 Einfluß der Höhenlage der Bewehrung - oben- (OL) und unten- (UL) liegende Stäbe, Einfluß der Größe der Betondeckung (Mischungen E 1, E 2, E 3 bzw. N 2)	14
6.2.1 Unten liegende Stäbe - Höhenlage UL (Bild 5)	15
6.2.2 Oben liegende Stäbe - Höhenlage OL (Bild 6)	15
6.2.3 Vergleich des Leichtbetons mit dem Normalbeton	15
6.3 Einfluß der Dauerbelastung	17
6.3.1 LB 300 - Mischungen E 1, E 2, E 3	18
6.3.2 Normalbeton - Mischungen N 1, N 2, N 3	19
6.3.3 Vergleich zwischen Normalbeton und Leichtbeton	20
7. Zusammenfassung	21
Literaturangabe	22
Tabelle 1 - 22	Anlage 1 - 22
Bild 1 - 6	21- 26

1. Einführung

Bei den bisher am Institut für Massivbau der Technischen Hochschule München durchgeführten Versuchsreihen zur Bestimmung der Verbundwirkung von geraden Betonstahlstäben, Betonstahlhaken und -schlaufen in Leichtbeton / (1), (2), (3) / wurde die Festigkeit der Leichtbetone / L.B. / durch verschiedene Festigkeit der Leichtzuschläge erreicht. Der Volumenanteil des Mörtels war dem Ziel der Versuche entsprechend klein (40%). Die Zusammensetzung des Mörtels wurde bis auf eine Versuchsreihe konstant gehalten (300 kg Zement/m³ Beton, wirksamer W/Z = 0,5 und 380 kg Natursand/m³ Beton).

$$\frac{100}{100} \sim 0,4$$

Mit dieser Zusammensetzung des L.B. wurde bei Verdichtung durch Innenrüttler immer ein geschlossenes Gefüge des Betons erzielt. Die Verarbeitbarkeit der in / (1), (2), (3) / verwendeten Leichtbetone lag mit einem Verdichtungsmaß von $v = 1,15 \sim 1,20$ etwa in der Mitte der praktisch sinnvollen Konsistenzgrenzen ($v = 1,08 - 1,30$). Die so zusammengesetzten Leichtbetone zeigten keine Neigung zum Entmischen. Die an verschiedenen Stellen eines 80 cm hohen Körpers gemessene Festigkeit war von der Höhenlage unabhängig (1). Es war daher zu vermuten, daß auch der in (1) gegenüber Normalbeton festgestellte geringe Einfluß der Lage der Bewehrungsstäbe zur Betonierrichtung und der Höhenlage der Bewehrung auf das Verbundverhalten eben diesen vorgenannten Eigenschaften des Frischbetons zuzuschreiben ist.

Es ist aber bekannt, daß der Fertigungsaufwand im allgemeinen und das Steiferwerden des Frischbetons im Laufe der Zeit nach dem Mischen für L.B. größer als bei Normalbeton (N.B.) ist. Es wird daher für die Praxis manchmal eine weichere Konsistenz ($v = 1,08 \sim 1,12$) als die in den Versuchen / (1), (2), (3) / gewählte, empfohlen und dementsprechend auch ein höherer Zementgehalt z.B. für LB 300 : 350 ~ 380 kg/m³ (4). Bei sehr weichen Betonen (Konsistenz K 3) mit einem Ausbreitmaß von mehr als 42 cm können die bisher gefundenen Abhängigkeiten des Verbundverhaltens sich schon durchaus ändern. Es erschien deshalb notwendig den bei Normalbeton weicher Konsistenz vorhandenen ausgeprägten Einfluß der Lage der Bewehrungsstäbe zur Betonierrichtung auf die Verbundqualität für Leichtbetone verschiedener Zusammensetzung (bis zur kritischen Konsistenz) zu überprüfen.

In (1), (2) u. (3) wurde festgestellt, daß das Verbundverhalten von St III RK in L.B. unter Gebrauchslast (Endschlupf $\Delta = 0,1$ mm) zwar besser als in N.B. entsprechender Festigkeit ist, daß aber wegen der niedrigeren Spaltzugfestigkeit des L.B. höhere Anforderungen hinsichtlich der Bruchsicherheit einer Verankerung als bei N.B. zu stellen sind. Die an Ausziehkörpern üblicher Abmessungen (10 ϕ Kantenlänge) und einem mittig einbetonierten Stab von relativ kurzer Einbettungslänge gefundenen Ergebnisse erfassen diesen Einfluß nur ungenau. Es schien daher richtig, einige Ausziehkörper mit geringeren Überdeckungsschichten der Stäbe zu untersuchen.

Als Ergänzung zu den Versuchen (1) wurden einige Tastversuche über den Einfluß einer langsam wiederholten Belastung auf den Verbund des in (1) verwendeten Stahles St III RK ϕ 12 mm bei LB 225 u. LB 400 (weiter als Mischung K 1 bzw. K 2 bezeichnet) durchgeführt. Bei diesen Tastversuchen wurde festgestellt, daß sich der bei der Erstbelastung erreichte Schlupf von $\Delta_0 = 0,02$ bis 0,1 mm schon nach etwa 10 maliger Belastung und Entlastung verdoppelte, wobei die wiederholte Belastung bei LB 225 zu einem frühzeitigen Spaltbruch bei Schlupfwerten von $0,1 < \Delta < 0,2$ mm führte. Durch weitere Versuche sollte untersucht werden, ob auch die in der Praxis häufig vorhandene Dauerbelastung zu ähnlich ungünstigen Ergebnisse führen wird.

2. Versuchsprogramm und Versuchskörper

Im Rahmen der nachstehend beschriebenen Untersuchungen wurden folgende Einflüsse auf das Verbundverhalten von Stahl in Leichtbeton studiert:

- a) Einfluß der Lage der Bewehrungsstäbe zur Betonierrichtung auf das Verbundverhalten eines "walzfrischen" Stahles St III RK ϕ 12 mm in LB 300 verschiedener Zusammensetzung und Konsistenz und in N.B. vergleichbarer Zusammensetzung aber verschiedener Festigkeit ($\beta_w = 280 \sim 530$ kp/cm²). In den Ausziehkörpern mit Abmessungen 12 x 12 x 12 cm wurden die Stäbe mittig liegend und mittig stehend (gegen Setzrichtung des Betons herausgezogen) einbetoniert.

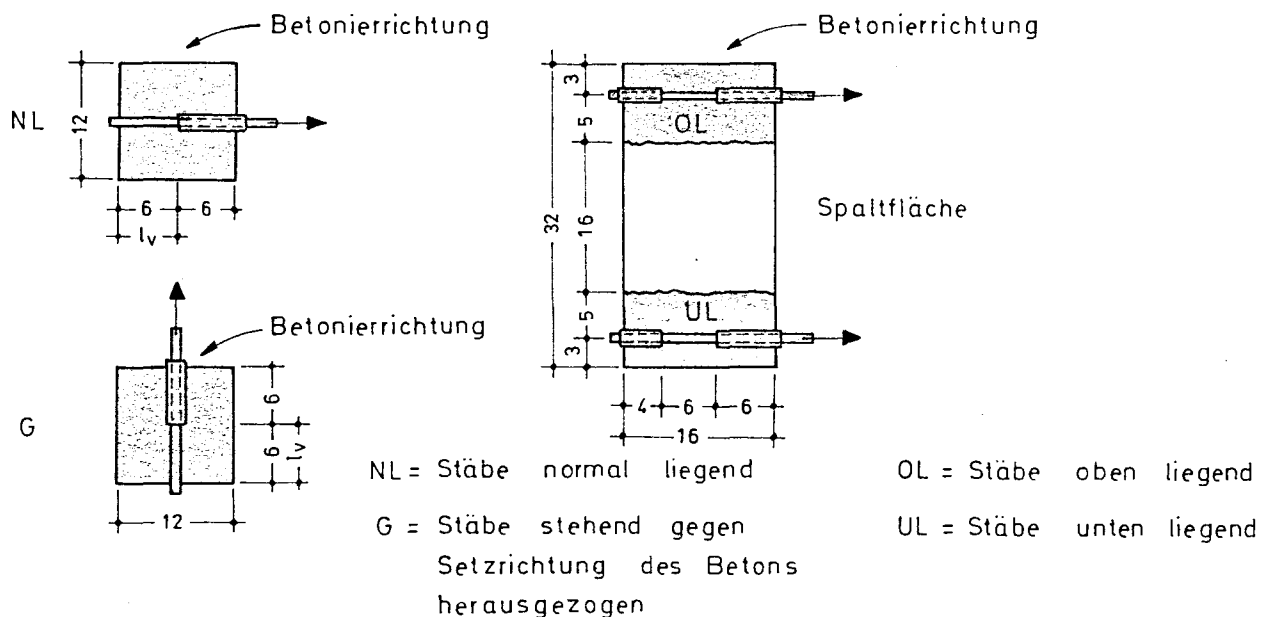
- b) Die Zunahme der Verschiebung am unbelasteten Stabende unter ein-
stündiger Dauerbelastung bei Lasten, die Anfangswerten von $\Delta_0 = 0,02$
bzw. $0,05$ bzw. $0,1$ mm entsprachen. Die Versuchskörper entsprechen
den unter a) beschriebenen.
- c) Einfluß der Höhenlage der Bewehrung bei kleinen Betondeckungen der
Stäbe. Von jeweils 3 verschiedenen Mischungen mit L.B. und H.B.,
die zur Untersuchung der Aufgaben a und b hergestellt wurden,
wurden dafür aus allen 3 L.B.-Mischungen und einer H.B.-Mischung
weitere Ausziehkörper mit den Abmessungen $16 \times 16 \times 32$ cm mit oben-
und untenliegenden Stäben gefertigt.

Bei allen Versuchskörpern betrug die Einbettungslänge $l_v = 5 \phi = 6$ cm
und die verbundfreie Vorlänge an der Zugseite des Ausziehkörpers eben-
falls $5 \phi = 6$ cm. Bei den Prüfkörpern für die Untersuchung der Höhen-
lage mit Abmessungen $16 \times 16 \times 32$ cm war zur Ausschaltung des Schalungs-
effektes an der unbelasteten Seite des Ausziehkörpers eine weitere
4 cm lange verbundfreie Strecke angeordnet.

In der nachfolgenden Tabelle sind alle durchgeführten 114 Versuche zusammengestellt.

Betonart, (Zuschlag)	Nr. der Mischung β_w (kp/cm ²)	die Lage des Stabes beim Betonieren und entsprechende Zahl der Ausziehkörper				Art der durchgeführten Versuche
		G	NL	UL	OL	
L.B. (Liapor 4)	K 1 $\beta_{w35} = 250$	-	5W	-	-	W = mit wiederholter Belastung
L.B. (Liapor 7)	K 2 $\beta_{w35} = 428$	-	5W	-	-	
L.B. (Liapor 5)	E 1 $\beta_{w28} = 296$	10=2K+8D	6=2K+4D	3K	3K	D = mit Dauerbelastung K = mit kurzzeitiger Belastung (stetige, bis zum Bruch führende Belastung)
L.B. (Liapor 5)	E 2 $\beta_{w28} = 316$	10=2K+8D	6=2K+4D	3K	3K	
L.B. (Liapor 5)	E 3 $\beta_{w28} = 312$	6K	6=4K+2D	3K	3K	
N.B.	N 1 $\beta_{w16} = 280$	6=2K+4D	6=2K+4D	-	-	
N.B.	N 2 $\beta_{w26} = 530$	6=2K+4D	6=2K+4D	3K	3K	
N.B.	N 3 $\beta_{w14} = 374$	6=2K+4D	6=2K+4D	-	-	

1) Lage der Bewehrung zur Betonierrichtung und Prüfkörperabmessungen:



3. Versuchsmaterial

3.1 Beton

3.1.1. Leichtbeton

Der Leichtbeton wurde in Güteklassen LB 225 bzw. LB 400 für die Tastversuche mit wiederholter Belastung und LB 300 für das unter Abschn. 2 angeführte Programm hergestellt. Als Zuschlag wurde ähnlich wie in (1), (2) und (3) Blähton des Herstellers Lias Leichtbaustoffe, Schömborg verwendet, der jeweils in zwei Körnungen geliefert wird, und zwar F (Feinkörnung) und G (Grobkörnung). Für LB 225 wurde Liapor 4, für LB 300 Liapor 5 und für LB 400 Liapor 7 benützt. Die Kornzusammensetzung dieser Zuschläge wie auch des verwendeten Natursandes entsprechen den in (1) u. (2), Tab. 2, 4 u. 5 angegebenen Werten. Zum Betonieren wurde Portlandzement Z 375 des Herstellerwerkes Harburg benützt. In der Tab. 1 sind die Festigkeitseigenschaften des Zementes, der für LB 225 und LB 400 und in Tab. 2 die Festigkeitseigenschaften des Zementes der bei den übrigen Mischungen (LB 300) verwendet wurde, angegeben.

Die Leichtzuschläge wurden vor dem Betonieren einen Tag in Wasser gelagert und nachträglich 1,5 Stunden zum Abtropfen auf einen Holzrost gelegt. Die Wasseraufnahme betrug für alle drei Leichtzuschlagsarten etwa 20%.

Die Zusammensetzung des LB 225 und LB 400 für die Tastversuche (Mischung K 1 und K 2) war dieselbe wie bei den entsprechenden Betongütern (1), (2) u. (3), d.h.: 20-Vol-% Natursand (bezogen auf das Zuschlagsvolumen), 300 kg/m³ Z 375 und wirksamer Wasserzementwert $(W/Z)_{\text{NETTO}} = 0,48$.

Bei den Mischungen E 1, E 3 entsprach die Zusammensetzung des Mörtels der des LB 300 in (1) (Zement: Natursand = 1,27 und $(W/Z)_{\text{NETTO}} = 0,5$), nur der Zementgehalt wurde von 300 kg/m³ in (1) auf 350 kg/m³ bei E 1 und auf 400 kg/m³ bei E 3 erhöht. Da mit der Erhöhung des Zementgehaltes auch der wirksame Wassergehalt entsprechend erhöht wurde, wurde bei vergleichbarer Mörtelfestigkeit in E 1 und E 3 nur die Konsistenz geändert. Vorversuche mit derselben Mörtelzusammensetzung und Leichtzuschlag Liapor 5 wie bei

der Mischungen E 1 und E 3 aber mit einem Zementgehalt von 375 bzw. 450 kg/m^3 haben gezeigt, daß die Konsistenz der Mischung E 3 bereits einen Grenzwert darstellt, der in der Praxis kaum überschritten werden wird.

Die Zusammensetzung der Mischung E 2 wurde so gewählt, damit bei einer größeren Mörtelfestigkeit die Konsistenz etwa dieselbe wie bei der Mischung E 1 war. Bei demselben Verhältnis $Z : NS = 1,27$ wie bei E 1, aber einem erhöhten Zementgehalt (400 kg/m^3), sollte das mit einem gleichen Wassergehalt von 175 l/m^3 für beide Mischungen E 1, E 2 erreicht werden. Dabei wurde von der Erfahrung ausgegangen, daß die Konsistenz von Betonen mit wenig abweichender Zusammensetzung etwa mit dem Wassergehalt gegeben ist.

In Tab. 4 sind die wichtigsten Angaben über die hier angewendeten Leichtbetone wiedergegeben.

Die Prüfkörper wurden nach dem Betonieren 1 Tag unter nassen Tüchern gelagert, dann ausgeschalt und weitere 6 Tage feucht gelagert (95% R.L.F.). Anschließend wurden sie bis zur Prüfung in einem Klimaraum mit 20°C und 65% R.L.F. (Mischungen K 1 und K 2) bzw. 45% R.L.F. (Mischungen E 1, E 2 und E 3) gelagert.

3.1.2 Normalbeton

Die Zusammensetzung und die wichtigsten Eigenschaften der 3 Mischungen für N.B. sind in Tab. 5 angegeben. Die Zusammensetzung der Mischungen N 1 und N 2 ist der Mischung E 1 für LB 300 (siehe Tab. 4) sehr ähnlich: bei demselben Mörtelgehalt und derselben Mörtelzusammensetzung wurde hier nur der Leichtzuschlag ($F_5 + G_5$) durch Flußkies ($3/7 + 7/15$) ersetzt. Bei der Mischung N 1 wurde außerdem anstelle eines Portlandzementes Z 375 ein Hochofenzement HOZ 275 verwendet, so daß die Festigkeit bei sonst ähnlichen Verhältnissen etwa der Festigkeit beim LB 300 (Mischung E 1) entsprach. Die Festigkeitseigenschaften des HOZ sind in Tab. 3 angegeben. Bei Mischung N 3 entsprechen Gehalt und Zusammensetzung des Kiessandes den Werten der Mischungen N 1 und N 2, auch der

Zementleimgehalt blieb konstant. Geändert wurde nur der W/Z -Wert, so daß eine extreme aber nach DIN 1045 E noch zugelassene Konsistenz erreicht werden konnte (Ausbreitmaß = 50 cm).

Die Lagerungsbedingungen bei den Prüfkörpern aus den Mischungen N 1, N 2, N 3 waren dieselben wie bei den Mischungen E 1, E 2, E 3 aus LB 300.

3.2 Bewehrungsstahl

Alle hier beschriebenen Versuche wurden mit handelsüblichem Betonstahl St III RK 12 mm durchgeführt. Bei den Ausziehkörpern aus LB 225 und LB 400 (Tastversuche) wurde Stahl von derselben Lieferung wie bei Versuchen in (1), (2) und (3) verwendet. Obwohl die Oberfläche dieses Stahles nur mit Flugrost bedeckt war, war die Oberflächenrauigkeit sehr groß.

Um den günstigen Einfluß der Oberflächenrauigkeit in den weiteren Versuchen auszuschließen, wurde für die Versuche mit LB 300 (Mischung E 1, E 2, E 3) und für die entsprechenden Vergleichsversuche mit NB (Mischung N 1, N 2, N 3) eine neue Stahllieferung in "walzfrischem" Zustand verwendet.

In Tab. 6 sind die Abmessungen der Oberflächenprofilierung und die Festigkeitseigenschaften beider Lieferungen angegeben.

Die nach DIN 488 E berechneten Rippenflächen f_R sind in beiden Fällen wesentlich größer als der geforderte Mindestwert von 0,065. Die nur von dem Anteil der Schrägrippen herrührende bezogene Rippenfläche f'_R ist dagegen bei den Stäben der zweiten Lieferung mit $f'_R = 0,0597$ verhältnismäßig klein, so daß die Ergebnisse dieser Versuche weitgehend einem Stahl mit der Mindestprofilierung entsprechen dürften.

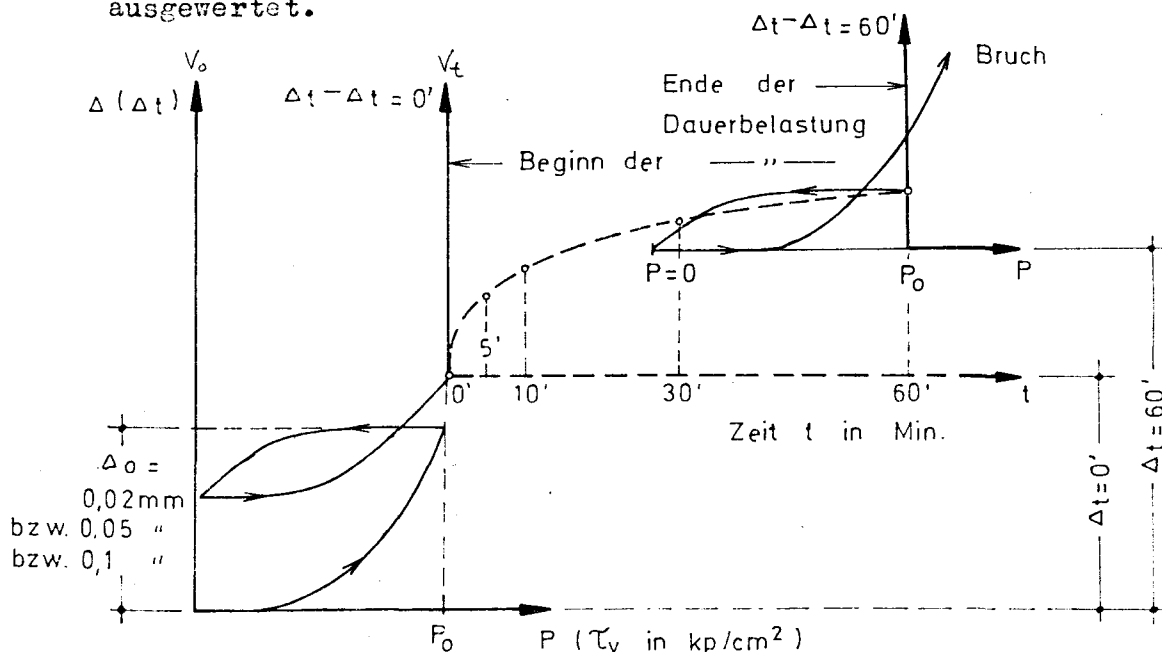
Um die Streuung der Versuche zu verringern, wurden die Stäbe vor dem Einbetonieren entfettet. Die Stäbe der ersten Lieferung wurden vor dem Entfetten zusätzlich mit einer Drahtbürste vom Flugrost gereinigt.

4. Versuchsdurchführung

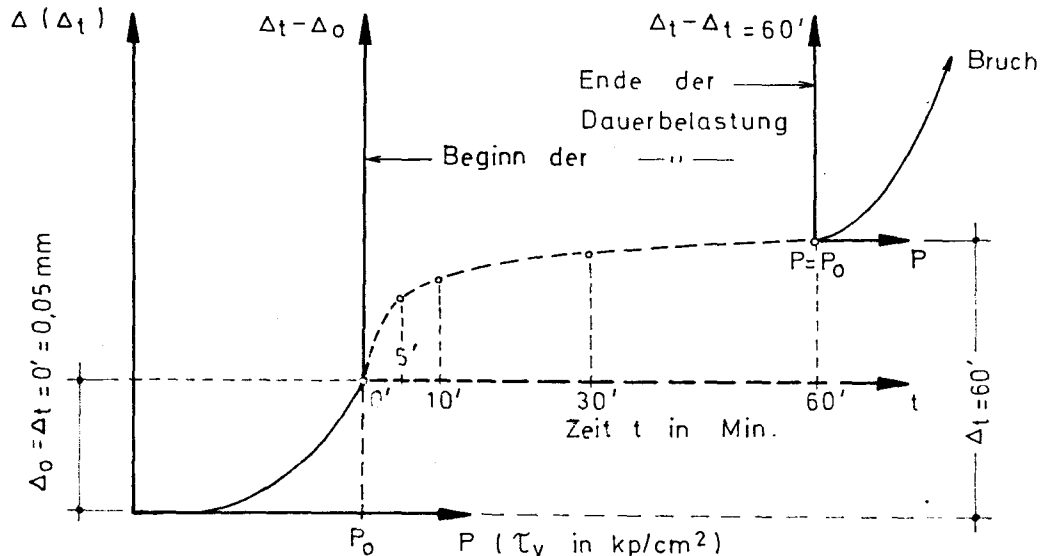
Die Ausziehkörper, deren Abmessungen und Lage beim Betonieren unter Abschnitt 2 beschrieben sind, wurden in einer 5 Mp-Zugprüfmaschine geprüft. Die Maschine war mit einer elektrischen Kraftmeßeinrichtung ausgerüstet. Der Schlupf des Stabes wurde am unbelasteten Stabende mit einem induktiven Wegaufnehmer gemessen. Beide Meßgeräte waren mit einem Koordinatenschreiber verbunden. Die Belastungsgeschwindigkeit wurde so gesteuert, daß die mittlere Haftspannung um etwa $0,5 \text{ kp/cm}^2/\text{sec.}$ zunahm. Die Ausziehkörper der Mischungen E 1, E 2, E 3 und N 1, N 2, N 3, bei denen der Einfluß der Dauerbelastung untersucht wurde, wurden zunächst bis zu einer dem vorgesehenen Schlupf ($\Delta_0 = 0,02$ bzw. $0,05$ bzw. $0,1 \text{ mm}$) entsprechenden Ausziehenkraft P_0 belastet, dann entlastet und wiederum auf P_0 belastet. Diese Kraft wurde mit einer in der Zugprüfmaschine eingebauten Vorrichtung während einer Stunde konstant gehalten. Danach wurde der Prüfkörper wiederum entlastet und anschließend mit einer stetig steigenden Ausziehenkraft bis zum Bruch bzw. bis zur Höchstlast der Maschine belastet.

5. Grundlagen für die Auswertung und Deutung der Versuchsergebnisse

Bei den Ausziehversuchen der Mischungen E 1, E 2 und N 1, N 2, N 3 wurden in jeder Gruppe (normal liegende Stäbe - NL und stehend einbetonierte Stäbe - G) jeweils zwei Körper mit stetig steigender Kraft bis zum Bruch bzw. bis zur Höchstlast der Maschine ($5 - 5,2 \text{ Mp}$), bzw. bis zum maximal meßbaren Endschlupf des Stabes ($\Delta = 2 \text{ mm}$) belastet. Die übrigen Ausziehkörper wurden nach folgendem Schema geprüft und ausgewertet.



Um den Einfluß der Entlastung nach dem Erreichen des Schlupfes Δ_0 auf die weitere Zunahme des Schlupfes unter der Dauerlast festzustellen, wurden jeweils zwei Ausziehkörper aus den Mischungen E 1, E 2 (Lage G) nach dem Erreichen $\Delta_0 = 0,05$ mm nicht entlastet (siehe folgendes Schema):



6. Versuchsergebnisse

In den Tabellen 7 bis 22 sind die wichtigsten Meßergebnisse der Ausziehversuche mit Beton der Mischungen E 1, 2, 3 und N 1, 2, 3 eingetragen. Zu jeder Gruppe der Einzelergebnisse sind jeweils die Mittelwerte \bar{x} und die Variationskoeffizienten angegeben. Bei den Gruppen, bei denen Dauerlastversuche durchgeführt wurden, (Tab. 7, 8 u. 10 bis 18) haben die $\tau_{v,\max}$ -Werte und die entsprechenden Δ_{\max} -Werte nur eine qualitative Bedeutung, da diese unter verschiedenen Belastungsbedingungen erreicht wurden. Das betrifft auch die aus diesen Einzelergebnissen errechneten Mittelwerte \bar{x} . Die der Dauerlast entsprechenden Verbundspannungen τ_v sind in den Tab. 7, 8 und 10 bis 18 durch Umrahmung gekennzeichnet. Das Umrahmen der Δ_t -Werte für $t = 0'$ zeigt an, daß diese Körper beim Erreichen des Schlupfes $\Delta_0 = 0,05$ mm nicht entlastet wurden (Tab. 7, 8). Die Verbundspannungen τ_v , die für einen Schlupf $\Delta > \Delta_0$ in Klammern eingetragen sind, wurden durch Extrapolation ermittelt. Dies war nötig, um bei allen Versuchen den üblichen Vergleichswert von $\Delta = 0,1$ mm angeben zu können. Dabei wurde die Tatsache berücksichtigt, daß die Zunahme der τ_v -Werte zwischen $\Delta = 0,05$ und $0,1$ mm

verhältnismäßig klein ist: Aus jeweils mindestens 4 Meßergebnissen wurde der Mittelwert der Unterschiede $\tau_v (\Delta = 0,1) - \tau_v (\Delta = 0,05)$ festgestellt und dieser zu $\tau_v (\Delta_0 = 0,05)$ addiert.

6.1 Einfluß der Lage der Bewehrung zur Betonierrichtung - Lage NL u. G

6.1.1 LB 300 - Mischungen E 1, E 2, E 3

a) Bewehrung stehend einbetoniert - Lage G.

Die Einzelnergebnisse dieser Versuche sind in den Tab. 7 bis 9 angegeben und die Mittelwerte der auf B_w bezogenen Verbundspannungen τ_v/B_w von jeder Mischung (E 1 - 3) sind in Abhängigkeit vom Schlupf Δ in Bild 1 eingetragen. Zum Vergleich sind auch die Mittelwerte von τ_v/B_w von allen Versuchsergebnissen der Mischungen N 1, N 2, N 3 (Normalbeton) gestrichelt eingezeichnet. Man sieht, daß die Verbundspannungen mit zunehmender Verschiebung Δ in der Reihenfolge E 1, E 2, E 3, leicht abnehmen. Die τ_v/B_w -Werte liegen aber bei allen drei Mischungen aus Leichtbeton über den Mittelwerten für Normalbeton. Zwecks leichteren Vergleiches mit dem N.B. wurden auch bei LB 300 die Verbundspannungen τ_v auf B_w bezogen, da diese Abhängigkeit besser den Verhältnissen bei N.B. entspricht, als die für den L.B. in (1), (2), (3) gefundene Abhängigkeit $\tau_v = f(\sqrt{B_w})$. Für die Mischungen E 1, E 2, E 3 war die Wahl der Abhängigkeit $\tau_v = f(B_w)$ allerdings belanglos, da sich ihre Festigkeiten nur in sehr engen Grenzen ($B_w = 296$ bis 316 kp/cm^2) änderten.

Obwohl zwischen den Druck- und Spaltzugfestigkeiten der drei Leichtbetonmischungen nur sehr kleine Unterschiede vorhanden waren (siehe Tab. 4) ist auffallend, daß sich der maximale Schlupf mit zunehmendem Zement- oder Wassergehalt wie folgt verringert:

$$\Delta_{\max} = 0,622 \text{ bei E 1}$$

$$\Delta_{\max} = 0,326 \text{ bei E 2}$$

$$\Delta_{\max} = 0,24 \text{ bei E 3}$$

(Mittelwerte von Δ_{\max} in den Tab. 7 bis 9).

Bei allen Versuchskörpern der Serien E 1, E 2, E 3 erfolgte der Bruch durch das Aufspalten des Betonkörpers. In der Gruppe E 3 wurde dabei der Spaltbruch bei 3 von 6 Ausziehkörpern schon bei $\Delta_{\max} < 0,1$ mm erreicht (0,06, 0,02 u. 0,03 mm), so daß das vorgesehene Programm mit der Dauerlast nicht durchgeführt werden konnte (siehe Tab. 9). Es ist zu vermuten, daß die große Streuung der Δ_{\max} -Werte in dem wasserreichen LB-E3 durch ein zufälliges Entmischen entstand.

b) Bewehrung normal liegend - Lage NL

Die Einzelergebnisse sind in den Tabellen 10, 11 u. 12 zusammengestellt und die Mittelwerte in Bild 2 aufgezeichnet. Wie aus Bild 2 hervorgeht, ist der Einfluß der Zusammensetzung des LB 300 etwas größer als bei der Lage G, wobei die τ_v/B_w -Werte bei allen drei Mischungen E 1, E 2, E 3 deutlich über denjenigen des Normalbetons liegen. Auch hier wurden die besten Ergebnisse beim Bruch für die Serie E 1 erreicht. Bei zwei von 5 Körpern wurden sogar die Stäbe ohne Spalten aus dem Beton herausgezogen. Die kleinsten Δ_{\max} -Werte traten diesmal bei der Serie E 2 auf. Im Mittel wurden folgende Bruchverschiebungen gemessen:

$$\Delta_{\max} = 0,81 \text{ mm bei E 1}$$

$$\Delta_{\max} = 0,24 \text{ mm bei E 2}$$

$$\Delta_{\max} = 0,66 \text{ mm bei E 3.}$$

Im Durchschnitt sind die Δ_{\max} -Werte bei der Lage NL größer und streuen auch weniger als bei der Lage G, was etwa den früheren Erfahrungen bei den Versuchen (1) entspricht.

6.1.2 Normalbeton - Mischungen N 1, N 2, N 3

Die Einzelergebnisse für die Lage G sind in den Tab. 13, 14 u. 15 und für die Lage NL in den Tab. 16, 17 u. 18 angegeben. Die auf B_w bezogenen Mittelwerte der Verbundspannungen τ_v von jeder Gruppe sind für beide Lagen in Bild 3 eingetragen. Es ist kein eindeutiger Einfluß der unterschiedlichen Konsistenz der Betone N 1, N 2 N 3 auf das Verhältnis $\frac{(\tau_v)_G}{(\tau_v)_{NL}}$ festzustellen. Lediglich die Mischung

N 3 liefert im Vergleich zur Mischung N 2 etwas größere Werte $(\bar{\tau}_v)_G/(\bar{\tau}_v)_{NL}$ wie es dem Unterschied der Konsistenzen bei N 2 u. N 3 entspricht. Der größte Einfluß der Lage wurde bei der Mischung N 1, die mit HOZ bereitet wurde, beobachtet. Es ist unwahrscheinlich, daß sich die Zementart (Abbindezeit, spezifische Oberfläche des Zementes) so extrem auswirken könnte. Es sind also mehr zufällige Einflüsse zu vermuten.

Im Gegensatz zum Leichtbeton wurde ein Spaltbruch bei den Ausziehkörpern aus Normalbeton nur selten beobachtet. In der Regel wurden die Versuche bei Erreichen der Höchstlast der Prüfmaschine oder nach dem Erreichen des Schlupfes von 2 mm abgebrochen. Eine Ausnahme von dieser Regel bildet die Serie N 3/Lage G (Tab. 15), wo von insgesamt 6 Körpern bei 4 Körpern ein Spaltbruch bei $\Delta_{\max} = 1,08$ mm bis 2,0 mm erreicht wurde.

6.1.3 Vergleich des Normalbetons mit dem Leichtbeton

Die Versuchsgruppen des L.B. (E 1, E 2, E 3) und die des N.B. (N 1, N 2, N 3) sind, was die Konsistenz betrifft, vergleichbar. Den Mischungen E 1, E 2 stehen die Mischungen N 1, N 2 und der Mischung E 3 die Mischung N 3 gegenüber. Wie aus den Bildern 1, 2 u. 3 hervorgeht, ist kein ausgeprägter Unterschied im Verlauf der Kurven $\tau/B_w = f(\Delta)$ zwischen den einzelnen Serien des Leichtbetons einerseits und denjenigen des Normalbetons andererseits zu beobachten. Deshalb wurden alle Versuchsergebnisse in 4 Gruppen nach Betonart und Lage der Bewehrung zusammengefaßt. Die Mittelwerte \bar{x} und die Variationskoeffizienten v dieser Gruppen sind in den folgenden Tabellen angegeben. In der letzten Zeile jeder Tabelle ist das Verhältnis der Mittelwerte der bezogenen Spannung τ_v/B_w für Lage G und NL wiedergegeben.

LB 300 - Mittel aus E 1 + E 2 + E 3 (grafische Darstellung im Bild 4)

Lage	Statistische Parameter	τ_v/β_w -Werte bei einem Schlupf Δ in mm					
		0,001	0,005	0,01	0,02	0,05	0,1
stehend-G	\bar{x}_G	0,115	0,183	0,245	0,322	0,415	0,453
	v %	45	23	14	8,3	8,1	7,1
liegend-NL	\bar{x}_{NL}	0,115	0,165	0,206	0,247	0,301	0,345
	v %	54	28	18	14	12	9,2
Einfluß der Lage	$\frac{\bar{x}_G}{\bar{x}_{NL}}$	1,00	1,10	1,36	1,30	1,38	1,31

N.B. - Mittel aus N 1 + N 2 + N 3 (grafische Darstellung im Bild 4)

Lage	Statistische Parameter	τ_v/β_w -Werte bei einem Schlupf Δ in mm					
		0,001	0,005	0,01	0,02	0,05	0,1
stehend-G	\bar{x}_G	0,140	0,210	0,258	0,311	0,383	0,430
	v %	33	18	14	12	9,3	8,8
liegend-NL	\bar{x}_{NL}	0,104	0,143	0,160	0,186	0,236	0,286
	v %	37	16	16	16	12	9,5
Einfluß der Lage	$\frac{\bar{x}_G}{\bar{x}_{NL}}$	1,35	1,47	1,61	1,67	1,62	1,50

Der Vergleich der \bar{x}_{NL} -Werte wie auch der Verhältnisse \bar{x}_G/\bar{x}_{NL} für beide Betonarten bestätigt und erweitert die früheren Feststellungen in (1):

- a) Die Verbundspannungen eines liegend einbetonierten Rippenstahles im Leichtbeton sind bei der Gebrauchslast ($\Delta < 0,1$ mm) und bei ausreichender Betondeckung größer als beim Normalbeton entsprechender Festigkeit.
- b) Der Einfluß der Lage der Bewehrung zur Betonierrichtung ist beim L.B. kleiner als beim N.B. und das auch für äußerst weiche Leichtbetone.

Die auf B_w bezogenen Verbundspannungen τ_v für Lage G sind aber nur wenig von der Betonart abhängig (siehe die Linien G im Bild 4). Es hat sich wieder sehr deutlich die große Gefahr eines frühzeitigen Spaltbruches des Leichtbetons im Vergleich zum Normalbeton erwiesen (vergleiche auch die Spaltzugfestigkeit für L.B. und N.B. in der Tab. 4 u. 5).

6.2 Einfluß der Höhenlage der Bewehrung - oben- (OL) und unten- (UL) liegende Stäbe. Einfluß der Größe der Betondeckung (Mischungen E 1, E 2, E 3 bzw. N 2)

Die eigentlichen Versuchskörper OL und UL wurden jeweils durch Spalten in drei Teilen aus den Versuchskörpern nach Abschnitt 2 erhalten. Die Einzelergebnisse dieser Versuche sowie die Mittelwerte der auf B_w bezogenen Verbundspannungen τ_v sind jeweils für eine Mischung und die beiden Lagen in den Tab. 19, 20, 21 (E 1, E 2, E 3) und 22 (N 2) angegeben.

Gemeinsam ist allen hier betrachteten Ausziehversuchen mit kleinen Betondeckungen ($\bar{u}_b = 2,4$ cm) ein, gegenüber den Versuchen mit mittig liegend einbetonierten Stäben (Lage NL - $\bar{u}_b = 5,4$ cm), wesentlich früher d.h. bei kleineren Schlupfwerten erfolgender Spaltbruch. Dabei war die Bruchverschiebung bei den oben liegenden Stäben deutlich größer als bei den unten liegenden Stäben. Dies bedeutet, daß beim Spaltbruch erreichte Verbundspannung von der Höhenlage der Stäbe beim Betonieren unabhängig ist.

6.2.1 Unten liegende Stäbe - Höhenlage UL (Bild 5)

Für LB 300 unterscheiden sich die auf β_w bezogenen Verbundspannungen der unten liegenden Stäbe der Serien E 1, 2, 3 nur wenig voneinander, deshalb wurden alle 9 Einzelergebnisse zusammengefaßt. Die Mittelwerte dieser 9 Einzelergebnisse sind in Bild 5 eingetragen und mit den Mittelwerten des Normalbetons - N 2 verglichen. In der Größe der bezogenen Verbundspannungen besteht kein nennenswerter Unterschied zwischen L.B. und N.B. bis $\Delta = 0,02$ mm. Die $\tau_{v,max}/\beta_w$ -Werte waren beim Spaltbruch aber beim Normalbeton 1,27 mal größer als beim LB 300. Dementsprechend war auch Δ_{max} beim N.B. wesentlich größer (0,103 mm) als beim LB 300 (0,045 mm).

6.2.2 Oben liegende Stäbe - Höhenlage OL (Bild 6)

Beim Leichtbeton wurde wiederum die Tendenz wie bei mittig liegend einbetonierten Stäben (Abschn. 6.1) beobachtet: Schlechteres Verbundverhalten des Rippenstahles mit zunehmender Weichheit des L.B.. Die Verbundspannungen der Ausziehkörper aus der Mischung E 3 sind bis auf die Hälfte derjenigen aus der Mischung E 1 gesunken. Die Zahl der Einzelergebnisse in jeder Gruppe ist zu klein für eine detaillierte Analyse des Bruchverhaltens, jedoch sind die sehr kleinen Bruchverschiebungen der Serie E 2 beunruhigend und es ist schwer zu entscheiden, ob die verhältnismäßig guten Ergebnisse mit der Mischung E 1 oder die Werte der Serie E 2 nicht einem Zufall zuzuschreiben sind (siehe die kleinen Bruchdehnungen bei der Lage UL - Tab. 19). Es ist aber schon jetzt festzustellen, daß ein Leichtbeton mit kleinerem Verdichtungsmaß als $v = 1,1$ (beim kugelförmigen Blähton) für einen Konstruktionsleichtbeton ungeeignet ist.

6.2.3 Vergleich des Leichtbetons mit dem Normalbeton

Für die Untersuchung des Einflusses der Höhenlage der Bewehrung und der Betondeckung wurde aus dem Normalbeton nur die Mischung N 2 verwendet. Was die Zusammensetzung des Betons betrifft, ist mit der Mischung N 2 aus N.B. nur die Mischung E 1 aus L.B. vergleichbar

(derselbe Mörtelgehalt und dieselbe Mörtelzusammensetzung und-Festigkeit). Die Bilder 5 und 6 zeigen, daß die Verbundspannungen bei den Ausziehkörpern aus E 1 zwar nur wenig kleiner als beim N 2 sind, daß aber die Bruchdehnungen Δ_{\max} und Bruchspannungen $\tau_{v,\max}/B_w$ beim E 1 wesentlich kleiner sind als die beim N 2 (vergleiche die Tab. 19 und 22). Die Tatsache, daß die τ_v/B_w -Werte (für $\Delta \leq 0,1$) bei mittig liegend einbetonierten Stäben (Lage NL, $\bar{u}_b = 5,4$ cm - Bild 2) bei Leichtbeton größer sind als bei Normalbeton scheint darauf hinzudeuten, daß die am Rand auftretenden Schwindspannungen beim Leichtbeton zu Mikrorissen führen können, die von Anfang an die Bettung des Stabes lockern. Dies wurde auch in /1/ bei Versuchen mit St III RK ϕ 26 bei Abminderung der Überdeckungsschicht von $\bar{u}_b = 11,2$ cm auf $\bar{u}_b = 6,7$ cm beobachtet. Weitere Versuche zur Klärung des Einflusses der Betondeckung sind dringend notwendig. Es ist auch nachzuweisen, ob andere Leichtzuschläge mit kleinerer Wasseraufnahme, wie etwa Blähschiefer, zu ähnlich ungünstigen Ergebnissen wie die Versuche mit kugelförmigem Blähton führen werden.

Bei den verglichenen Gruppen E 1 (Tab. 19) und N 2 (Tab. 22) wurden die, denselben Verschiebungen entsprechenden Verbundspannungen für die Höhenlage UL nur unwesentlich größer als für die Höhenlage OL (von den Bruchverschiebungen abgesehen). Die in der letzten Zeit am Institut für Massivbau der TH München durchgeführten Ausziehversuche an Körpern aus Normalbeton von großen Abmessungen haben jedoch gezeigt, daß der Verbund der unmittelbar am oberen Rand des Betonquerschnittes liegenden Stäbe durch nachträgliches Abziehen der Oberfläche des Körpers (Nachverdichten der oberen Schicht) sehr günstig beeinflusst wird. Die etwas tiefer liegenden Stäbe zeigten ein wesentlich schlechteres Verbundverhalten als die ganz oben liegenden Stäbe. Bei diesen Versuchen hat sich auch die Schalungswirkung auf den Verbund der der Schalung näher liegenden Stäbe als sehr günstig erwiesen. Zur vollkommenen Abschätzung des Einflusses des Absetzvorganges von Leichtbeton auf das Verbundverhalten der Rippenstähle sind ähnliche Versuche an Ausziehkörper von großen Abmessungen und mit Stäben von größerem Durchmesser (z.B. ϕ 20 mm) durchzuführen.

6.3 Einfluß der Dauerbelastung

Da in der Praxis aus mehreren Gründen eine Begrenzung der Rißbreiten erforderlich ist, hängt die ausnutzbare Verbundqualität eines Bewehrungsstabes in erster Linie vom Schlupf zwischen Stahl und umgebendem Beton ab. Die Ausziehkraft P_0 mit zeitlich längerer Einwirkungsdauer wurde deshalb als eine dem vorgegebenen Schlupf Δ_0 bei Erstbelastung zugeordnete Kraft festgelegt. Bei dem gegebenen nichtlinearen Verlauf der τ_v - Δ -Kurven wäre nämlich eine wesentlich größere Zahl von Versuchen notwendig, wenn die Dauerlast nach der Größe der Verbundspannungen geregelt wird. In den Tab. 7, 8 und 10 bis 18 sind die Einzelergebnisse der Dauerversuche in den Spalten "Gesamtschlupf Δ_t in mm für die Dauerlast nach t Minuten" angegeben. Die unter $t = 0'$ angegebenen Δ_t -Werte stellen den Schlupf, der nach Erstbelastung bis Δ_0 (0,02 bzw. 0,05 bzw. 0,1 mm) und nachfolgender Entlastung und Wiederbelastung auf P_0 aufgetreten war, dar. Bei den Ausziehkörpern, die bei Erreichen von Δ_0 nicht entlastet wurden - Körper G 4 u. G 7 (Tab. 7) und G 3, G 8 (Tab. 8) - ist $\Delta_0 = \Delta_t = 0'$. Die Schlupfwerte Δ_t entsprechen dem Gesamtschlupf, d.h. der Schlupfanteil aus der Erstbelastung (Δ_0), die Zunahme des Schlupfes aus der Entlastung bei Δ_0 und Wiederbelastung und endlich die Zunahme des Schlupfes unter Dauerlast ist enthalten.

Bei den Mischungen E 1, E 2 - Lage G (Tab. 7,8) wurden jeweils 2 + 2 Dauerversuche ($\Delta_0 = 0,05$ mm) mit und ohne Entlastung nach dem Erreichen der P_0 -Last durchgeführt. In den Werten des Gesamtschlupfes Δ_t nach 60 Minuten Dauerlast wurde für beide Belastungsarten kein wesentlicher Unterschied beobachtet, so daß der Einfluß der Erstentlastung auf die Δ_t -Werte für $t = 60'$ vernachlässigt werden kann. Die Zunahme des Schlupfes mit der Zeit t unterscheidet sich im allgemeinen nicht von den Kriechkurven für andere Arten der Belastung des Betons, d.h. daß sich die Zunahme des Schlupfes unter der Dauerlast mit der Zeit verringert. Der Zuwachs des auf den Anfangswert Δ_0 bezogenen Gesamtschlupfes

Δ_t ist aber wesentlich größer als bei üblichen Kriechversuchen an Beton. In den weiteren Betrachtungen wird vorwiegend von den bezogenen Gesamtschlupfwerten $\frac{\Delta_t}{\Delta_o}$ für $t = 60$ min. ausgegangen.

6.3.1 LB 300 - Mischungen E 1, E 2, E 3

In den folgenden Tabellen sind die Werte $(\Delta_t/\Delta_o)_{t=60'}$ in Abhängigkeit von Δ_o und der Lage der Bewehrung (G bzw. NL) angegeben. Die Werte $(\Delta_t/\Delta_o)_{t=60'}$ sind auf Grund der Einzelergebnisse in den Tab. 7, 8 bzw. 10 bis 12 jeweils als die den Δ_o -Werten zugeordneten Mittelwerte wiedergeben.

Mischung, (W/Z) _{NETTO}	Lage G			Lage NL		
	$(\Delta_t/\Delta_o)_{t=60'}$ für Δ_o in mm			$(\Delta_t/\Delta_o)_{t=60'}$ für Δ_o in mm		
	0,02	0,05	0,1	0,02	0,05	0,1
E 1, 0,50	1,75	2,19	2,71	Versuche bei $\Delta_o=0,02$ nicht durchge- führt	2,27	2,25
E 2 0,44	1,30	1,97	Spaltbr.		1,95	1,96 u. Spaltbr.
E 3 0,50	wegen frühzeitigen Spalt- bruches Dauerversuche nicht durchgeführt				2,12	Spaltbr.

Aus den Tabellenwerten geht folgendes hervor:

- a) Der auf Δ_o bezogene Gesamtschlupf wächst mit der Zunahme des Δ_o -Wertes. Das bedeutet, daß bis zu einem Schlupf $\Delta = 0,1$ mm, der bei den vorliegenden Verhältnissen etwa dem zulässigen Wert entspricht, das Kriechen als nicht linear angesehen werden kann. Bei $\Delta_o = 0,05$ bis $0,1$ ist der Unterschied der $(\Delta_t/\Delta_o)_{t=60'}$ -Werte klein und liegt innerhalb des Streubereiches.

- b) Das etwas kleinere Kriechen des Schlupfes bei den Körpern aus der Mischung E 2 gegenüber denjenigen aus der Mischung E 1 könnte auf den kleineren W/Z-Faktor des E 2 Betons zurückzuführen sein. Dies hat sich aber bei den Versuchen mit N.B. nicht bestätigt, so daß hier noch wesentlich eingehendere Untersuchungen notwendig sind.
- c) Mit zunehmendem Zement- und Wassergehalt wächst die Gefahr des Spaltbruches unter der Dauerbelastung.
- d) Die relative Zunahme des Schlupfes mit der Zeit hat sich als unabhängig von der Lage der Bewehrung zur Betonierichtung erwiesen.
- e) In Bezug auf die Schlupfzunahme und die Spaltbruchgefahr unter Dauerbelastung ist die üblicherweise als Grenzwert für zulässige Verbundspannungen angesehene Verschiebung $\Delta = 0,1$ mm auf Werte bis zu 0,05 mm (Mischung E 1) bzw. 0,02 mm (Mischung E 2) abzumindern. Die Zusammensetzung des L.B. - E 3 ist augenscheinlich ungeeignet (siehe auch Abschn. 6.2.2)

6.3.2 Normalbeton - Mischungen N 1, N 2, N 3

Mit N.B. wurden nur die Versuche mit dem Anfangsschlupf $\Delta_o = 0,05$ und 0,1 mm durchgeführt. Die Mittelwerte von jeweils zwei Ergebnissen $(\Delta_t/\Delta_o)_{t=60'}$ sind in der folgenden Tabelle gesammelt.

1	2	Mischung, Zementart, W/Z	Lage G		Lage NL	
			$(\Delta_t/\Delta_o)_{t=60'}$ für Δ_o		$(\Delta_t/\Delta_o)_{t=60'}$ für Δ_o	
			0,05 mm	0,1 mm	0,5 mm	0,1 mm
280	20,8	N 1, HOZ 275 0,5	1,57	1,75	1,50	1,54
530	34,0	N 2, PZ 375 0,5	3,54	3,86	2,19	2,18
274	21,8	N 3, PZ 275 0,66	2,45	2,71	2,34	2,14

Spalte 1 Würfeldruckfestigkeit in kp/cm^2
- 2 Spaltzugfestigkeit in kp/cm^2

Diese Ergebnisse bestätigen zwei im Abschn. 6.3.1 beschriebene Einflüsse:

- a) Kleiner Unterschied in den $(\Delta_t/\Delta_o)_{t=60'}$ -Werten für $\Delta_o = 0,05$ und $0,01$ mm (da auch der Unterschied zwischen $\tau_{v,o}$ -Werten klein ist)
- b) Die Unabhängigkeit der $(\Delta_t/\Delta_o)_{t=60'}$ -Werte von der Lage der Bewehrung.

Der große bezogene Zeitschlupf bei den Körpern der Mischung N 2 - Lage G ist durch die höheren Verbundspannungen $\tau_{v,o}$ bei $\Delta_o = 0,05$ bzw. $0,1$ mm zu erklären. Dies würde bedeuten, daß man die zulässigen Verbundspannungen bei Normalbeton zur Berücksichtigung des Einflusses von Dauerlasten bei hohen Betongüten wesentlich mehr als bei niederen Betongüten gegenüber den geltenden Werten abmindern muß.

Es zeigt sich kein Einfluß des W/Z-Faktors auf das Kriechen beim Verbund (vergleiche Mischungen N 2 u. N 3 - Lage NL). Die auffallend günstig liegenden $(\Delta_t/\Delta_o)_{t=60'}$ -Werte bei der Mischung N 1 sind mit aller Wahrscheinlichkeit dem bei N 1 verwendeten Hochofenzement zuzuschreiben, dazu ist außerdem noch zu bemerken, daß diese Versuche schon bei einem Betonalter von 16 Tagen durchgeführt wurden.

Bei keinem der Ausziehkörper aus NB kam es zum Spaltbruch unter der Dauerlast.

6.3.3 Vergleich zwischen Normalbeton und Leichtbeton

Mit den Ergebnissen des Normalbetons sind die Ergebnisse aus der Mischung E 1 vergleichbar, da der Mörtelgehalt bei den Mischungen N 1, N 2, N 3 und E 1 derselbe war. Da die Zementart bei der Mischung N 1 offensichtlich zu günstigeren Ergebnissen führte, bleiben zum Vergleich die Mischungen N 2, N 3 einerseits und die Mischung E 1 andererseits. Aus diesem Vergleich folgt:

- a) Das Kriechen des Leichtbetons bei Verbundbeanspruchung ist nicht größer als beim Normalbeton. Bei hoher Anfangsbeanspruchung des Normalbetons (Mischung N 2 - Lage G) ist das auf den Anfangsschlupf Δ_o bezogene Kriechen sogar wesentlich größer als das des Leichtbetons.

- b) Bei Leichtbeton kann schon eine Dauerbelastung bei Schlupfwerten $\Delta_0 = 0,1$ mm zum Spaltbruch führen. Auf Grund der Erfahrungen mit den Körpern mit kleiner Betondeckung (siehe Abschn. 6.2.3) ist aber die Gefahr des Spaltens der Betondeckung unter Dauerbelastung bei üblichen praktischen Ausführungen schon bei wesentlich kleineren Schlupfwerten als $0,1$ mm zu erwarten.

7. Zusammenfassung

Die wichtigsten Ergebnisse der vorliegenden Versuche mit LB 300 an geraden Stäben aus St III RK $\emptyset 12$ sind:

- a) Die aufnehmbaren Verbundspannungen eines liegend einbetonierten Rippenstahles in Leichtbeton sind bei Gebrauchslast ($\Delta < 0,1$ mm) und bei ausreichender Betondeckung größer als bei Normalbeton entsprechender Festigkeit.
- b) Der Einfluß der Lage der Bewehrung zur Betonierrichtung ist beim Leichtbeton kleiner als beim Normalbeton und das auch für äußerst weiche Leichtbetone. Bei kleineren Betondeckungen (hier $2\emptyset = 2,4$ cm) ist aber am oberen Rand des Betonkörpers bei sehr weichem Frischbeton (Verdichtungsmaß $v < 1,10$) mit spürbarer Entmischung zu rechnen. Die im allgemeinen kleinere Spaltzugfestigkeit des Leichtbetons im Vergleich zum Normalbeton ist durch am Rand eingetretene Schwindspannungen weiter abgemindert, so daß die bei Normalbeton übliche Betonüberdeckung bei Leichtbeton mit kugelförmigem Zuschlag aus Blähton mit hoher Wasseraufnahme nicht ausreichend ist. Es sind weitere Versuche zur Untersuchung des frühzeitigen Spaltbruches beim Leichtbeton durchzuführen.
- c) Das Kriechen des Leichtbetons bei Verbundbeanspruchung ist nicht größer als beim Normalbeton. Bei hoher Anfangsbeanspruchung des Normalbetons ist das auf den Anfangsschlupf Δ_0 bezogene Kriechen sogar wesentlich größer als das des Leichtbetons.
- d) Bei den Körpern aus Leichtbeton mit einer Überdeckung $\bar{u}_b = 5,4$ cm

kann eine Dauerbelastung schon bei Schlupfwerten $\Delta_0 = 0,1$ mm in einer Stunde zum Spaltbruch führen. Mit der Gefahr des Spaltens der Betondeckung unter Dauerbelastung ist bei üblichen praktischen Ausführungen ($\bar{u}_b = 2 \phi$) schon bei wesentlich kleineren Schlupfwerten als 0,1 mm zu rechnen.



(Dipl.-Ing. Martin)



(Dipl.-Ing. Janovic)

Literatur:

- (1) Martin H. Haftung von Betonstahl in Leichtbeton, Bericht
Nr. 6127, Lehrstuhl für Massivbau, TH München, Juli 1969
- (2) Martin H. Verbundwirkung von Betonstahlhaken in Leichtbeton,
Janovic K. Teil I, Bericht Nr. 6279, Lehrstuhl für Massivbau,
TH München, November 1969
- (3) Martin H. Verbundwirkung von Betonstahlschlaufen in Leicht-
beton, Bericht Nr. 6328, Lehrstuhl für Massivbau,
TH München, Januar 1970
- (4) Aurich H. Betontechnologische und baustellenpraktische Er-
fahrungen mit Konstruktionsleichtbeton, Beton
9/69

Tab. 1: Festigkeit des Portlandzements Z 375 Harburg gemäß DIN 1164
(verwendet bei Mischungen K 1 u. K 2)

Alter Tag	Biegezugfestigkeit kp/cm^2	Druckfestigkeit kp/cm^2
1	25	99
3	59	277
7	73	408
28	90	547

Tab. 2: Festigkeit des Portlandzements Z 375 Harburg gemäß DIN 1164
(bei Mischungen E 1, E 2, E 3 u. N 2, N 3)

Alter Tag	Biegezugfestigkeit kp/cm^2	Druckfestigkeit kp/cm^2
1	37	167
3	58	319
7	73	413
28	88	561

Tab. 3: Festigkeit des Hochofenzements HOZ 275 gemäß DIN 1164
(bei Mischung N 1)

Alter Tag	Biegezugfestigkeit kp/cm^2	Druckfestigkeit kp/cm^2
7	43	204
28	84	371

Tab. 4: Zusammensetzung, Konsistenz und Festigkeit der Leichtbetone

Mischung, Zuschlagsart	Zusammensetzung					Konsistenz 1)		Festigkeit	
	Zement (2375) kg/m ³	Natursand (0-3) kg/m ³	wirks. Wasser kg/m ³	Leicht- zuschlag (F+G) kg/m ³	wirksamer /w/z/ Netto	Verdichtungs- maß n. Walz	Ausbreit- maß in cm	Würfelf. in kp/cm ² Alter in T.	Spaltzugf. in kp/cm ² Alter in T.
K1(Liapor 4)	300	380	144	543	0,48	1,175/1,18 k2	-	261 - 42 T.	13,4 - 42 T.
K2(Liapor 7)	300	380	144	812	0,48	1,17/1,18 k2	-	446 - 41 T.	17,9 - 41 T.
E1(Liapor 5)	350	443	175	513	0,50	1,15/1,175 k2	38/-	296 - 28 T.	16,1 - 28 T.
E2(Liapor 5)	400	507	175	486	0,44	1,127/1,14 k2	39,5/33	316 - 28 T.	14,8 - 28 T.
E3(Liapor 5)	400	507	200	462	0,50	1,04/1,052 k3	43/37	312 - 28 T.	16,6 - 28 T.

1) erste Zahl 5 min. nach Mischen

zweite Zahl ~ 40 Min. nach Mischen

Tab. 5: Zusammensetzung, Konsistenz und Festigkeit der Normalbetone

Mischung	Zusammensetzung						Konsistenz ¹⁾		Festigkeit	
	Zement kg/m ³	Sand Kies in kg/m ³			Wasser kg/m ³	W/Z	Verdichtungs- maß n. W.	Ausbreitmaß in cm	Würfelfest. in kp/cm ² Alter in T.	Spaltzugfest. in kp/cm ² Alter in T.
		0-3	3-7	7-15						
N 1	350 (HOZ 275)	443	641	715	175	0,50	1,10 k3	41	280 - 16 T.	20,8 - 16 T.
N 2	350 (Z 375)	443	641	715	175	0,50	1,10 k3	40,5	530 - 26 T.	34,0 - 26 T.
N 3	293 (Z 375)	443	641	715	193,5	0,66	1,05 k3	49	374 - 14 T.	26,8 - 14 T.

1) Beim N.D. wurde die Konsistenz nur 5 Min. nach Mischen gemessen.

Tab. 6: Abmessungen der Profilierung und Festigkeitseigenschaften des St III RK ϕ 12 mm

Stahllieferung zur Mischung	ϕ	k	F_R mm ²	β	c_S mm	i	a_1 mm	$n \cdot d_e$ mm	f_R	f'_R	F_e cm ²	$B_{0,2}$ kp/cm ²	B_Z kp/cm ²
K 1, K 2 - auch in (1), (2), (3) ver- wendet -	12	2	30,4	42°	12,4	2	0,8	139	0,0995	0,0875	1,103	4306	5346
E 1, E 2, E 3, N 1, N 2, N 3 -neue Lieferung	12	2	18,5	47°	12,2	2	1,43	122	0,0824	0,0597	1,115	5240	6478

$$f_R = \frac{k \cdot F_R \cdot \sin \beta}{\pi \cdot d_e \cdot c_S} + \frac{i \cdot a_1}{n \cdot d_e}$$

$$f'_R = \frac{k \cdot F_R \cdot \sin \beta}{\pi \cdot d_e \cdot c_S}$$

Dabei ist:

F_R = Längsschnittfläche einer Rippe in deren Achse

β = Neigung der Rippen zur Stabachse

d_e = Stabdurchmesser

c_S = Schrägrippenabstand (nach Abschnitt 2.2 der DIN 488 E-Entwurf)

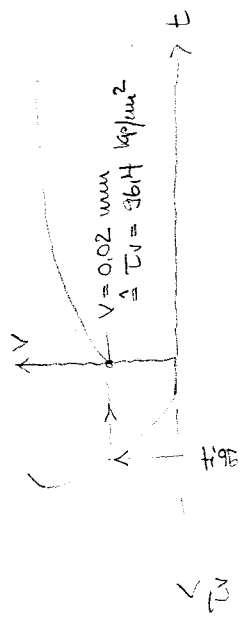
a_1 = Höhe der Längsrippen

$n \cdot d_e$ = Schlaglänge

i = Anzahl der Längsrippen

k = Anzahl der Schrägrippenreihen

E1 - 05 4.96



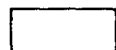
Ergebnisse der Ausziehversuche

Tab. 7: Leichtbeton - Mischung E 1 ($\beta_{w28} = 296 \text{ kp/cm}^2$, $\beta_{z28} = 16,1 \text{ kp/cm}^2$)

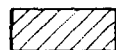
Lage zur Betonierriechung: stehend - gegen (G)

Körper	τ_v -Spannungen in kp/cm^2 bei Δ in mm							Gesamtschlupf Δ_t in mm unter der Dauerlast nach t min.					$\tau_{v,\max}$ kp/cm^2	Δ_{\max} mm
	0,001	0,005	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0'	5'	10'	30'	60'		
E1-														
G 1	22,4	44,9	65,0	88,4	112,5	122,9	135,2	mit stetig steigender Kraft bis zum Bruch belastet					164,6	0,80
G 2	44,4	60,6	74,9	91,1	113,9	123,8		0,129	0,152	0,160	0,181	0,199	170,0	0,72
G 3	16,2	43,1	64,1	90,6	125,6	(136,7)		0,061	0,074	0,079	0,090	0,100	147,1	0,18
G 4	42,6	61,9	79,8	100,0	128,3	(139,3)		0,050	0,099	0,113	0,142	0,166	164,6	0,86
G 5	34,6	56,1	70,3	96,4	-	-		0,023	0,027	0,028	0,03	0,032	159,2	0,58
G 6	52,5	66,8	79,8	93,3	-	-		0,027	0,031	0,033	0,035	0,038	161,0	0,49
G 7	27,4	50,7	73,1	102,7	144,4	(155,5)		0,050	0,061	0,065	0,073	0,083	183,4	0,84
G 8	31,8	54,7	74,0	97,3	125,6	(136,7)		0,060	0,07	0,074	0,082	0,089	175,8	0,78
G 9	56,1	72,2	87,0	106,7	132,8	143,1		0,165	0,225	0,243	0,295	0,342	143,1 ⁺	0,45
G 10	18,4	40,8	63,7	93,3	119,8	133,7		mit stetig steigender Kraft bis zum Bruch belastet					172,7	0,52
\bar{x}	34,6	50,2	73,2	96,0	125,4	136,4							164,1	0,622
v (%)	40	19	10	6,1	8,3	7,7								

+) Spaltbruch bei Entlastung - Belastung nach 60 min. Dauerlast



Der Dauerlast entsprechende Verbundspannung



Die Körper wurden beim Erreichen des Schlupfes $\Delta_0 = 0,05 \text{ mm}$ nicht entlastet

Ergebnisse der Ausziehversuche

Tab. 8: Leichtbeton - Mischung E 2 ($\beta_{w28} = 316 \text{ kp/cm}^2$, $\beta_{z28} = 14,8 \text{ kp/cm}^2$)

Lage zur Betonierriechung: stehend - gegen (G)

Körper E2-	τ_v -Spannungen in kp/cm^2 bei Δ in mm							Gesamtschlupf Δ_t in mm unter der Dauer- nach t Min.					$\tau_{v,\max}$ kp/cm^2	Δ_{\max} mm
	0,001	0,005	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0'	5'	10'	30'	60'		
G 1	14,4	37,2	61,1	93,3	132,3	146,2	160,1	mit stetig steigender Kraft bis zum Bruch belastet					167,3	0,34
G 2	33,5	60,1	80,7	106,3	136,8	(148,8)		0,069	0,078	0,082	0,091	0,101	163,7	0,35
G 3	18,0	44,0	65,0	87,5	112,1	(124,1)		0,050	0,062	0,064	0,068	0,073	142,2	0,28
G 4	29,2	50,2	68,2	90,2	-	-		0,022	0,024	0,024	0,026	0,026	156,5	0,33
G 5	14,8	38,1	62,8	98,7	140,8	144,4		Spaltbruch beim Beginn der Entlastung					144,4	0,10
G 6	74,5	87,5	104,5	125,1	147,1	157,4		0,162	0,300	Spaltbruch nach 7,4 min. Dauerlast			157,4	0,35
G 7	58,3	74,0	87,9	104,5	-	-		0,023	0,025	0,025	0,025	0,026	149,4	0,25
G 8	50,2	68,6	84,8	104,5	130,5	(142,5)		0,050	0,073	0,080	0,096	0,108	169,1	0,44
G 9	36,3	55,2	77,6	102,7	133,2	(145,2)		0,069	0,085	0,090	0,102	0,113	164,6	0,50
G 10	22,4	45,8	67,3	92,9	117,1	129,2	143,1	mit stetig steigender Kraft bis zum Bruch belastet					152,5	0,32
\bar{x}	35,3	56,1	76,0	100,6	131,2	142,2							156,7	0,33
$v(\%)$	57	29	18	11	8,9	7,5								

 Der Dauerlast entsprechende Verbundspannung

 Die Körper wurden beim Erreichen des Schlupfes $\Delta_0 = 0,05 \text{ mm}$ nicht entlastet

Ergebnisse der Ausziehversuche

Tab. 9: Beton LB 300 - Mischung E 3 ($\beta_{w28} = 312 \text{ kp/cm}^2$, $\beta_{z28} = 16,6 \text{ kp/cm}^2$)

Lage zur Betonierriechung: stehend - gegen (G)

Körper E3-	τ_v -Spannungen in kp/cm^2 bei Δ in mm							$\tau_{v,\max}$ kp/cm^2	Δ_{\max} mm
	0,001	0,005	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2		
G 1	13,5	39,5	62,8	90,6	120,2			122,0	0,06
G 2	42,6	59,7	74,0	94,2	116,6	130,1	150,2	159,2	0,30
G 3	29,2	52,9	76,3	100,9				100,9	0,02
G 4	49,4	67,3	84,3	104,1	126,5	140,4	157,0	178,0	0,42
G 5	53,8	74,0	91,1	114,4				125,6	0,03
G 6	35,8	57,0	76,3	101,8	131,0	142,6	159,7	168,2	0,45
\bar{x}	37,4	58,4	77,5	101,0	123,6	137,7	154,0	142,3	0,24
v (%)	39	20	12	8,2	-	-	-	21	

Ergebnisse der Ausziehversuche

Tab. 10: Beton LB 300 - Mischung E 1 ($\beta_{w28} = 296 \text{ kp/cm}^2$, $\beta_{z28} = 16,1 \text{ kp/cm}^2$)

Lage zur Betonierichtung: normal liegend (NL)

Körper E 1 -	τ_v -Spannungen in kp/cm^2 bei Δ in mm							Gesamtschlupf Δ_t in mm unter der Dauerlast nach t Min.					$\tau_{v,\max}$ kp/cm^2	Δ_{\max} mm
	0,001	0,005	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0'	5'	10'	30'	60'		
NL 1	11,2	31,4	48,5	64,1	81,2	94,2	112,5	mit stetig steigender Kraft bis zum Bruch belastet					157,4	0,79
NL 2	58,3	66,8	74,9	86,6	100,5	111,2		0,126	0,160	0,170	0,189	0,21 ⁺	111,2	0,21
NL 3	76,7	80,7	86,1	94,6	105,4	(116,9)		0,075	0,101	0,107	0,117	0,128	182,5	0,74
NL 4	20,2	43,1	59,2	75,8	92,8	(104,4)		0,064	0,080	0,084	0,092	0,099	163,7	1,25 ⁺⁺
NL 5	53,8	64,1	74,5	85,7	98,2	107,6		0,130	0,172	0,186	0,218	0,24	145,3	0,54
NL 6	26,9	43,1	57,0	71,8	90,2	103,2	117,0	mit stetig steigender Kraft bis zum Bruch belastet					157,9	1,35 ⁺⁺
\bar{x}	41,2	54,9	66,7	79,8	94,7	106,3							153,0	0,81
v (%)	62	34	21	14	9,0	7,3								

+ Spaltbruch unter Dauerlast (nach 57 min.)

++ Stab herausgezogen

Der Dauerlast entsprechende Verbundspannung

Ergebnisse der Ausziehversuche

Tab. 11: Beton LB 300 - Mischung E 2 ($\beta_{w28} = 316 \text{ kp/cm}^2$, $\beta_{z28} = 14,8 \text{ kp/cm}^2$)

Lage zur Betonierriechung: normal liegend (NL)

Körper E2-	τ_v -Spannungen in kp/cm^2 bei Δ in mm							Gesamtschlupf Δ_t in mm unter der Dauerlast nach t Min.					$\tau_{v,\max}$ kp/cm^2	Δ_{\max} mm
	0,001	0,005	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0'	5'	10'	30'	60'		
NL 1	32,3	45,3	56,1	68,6	85,7	99,1	116,2	mit stetig steigender Kraft bis zum Bruch belastet					131,0	0,34
NL 2	42,6	56,1	65,0	74,9	88,8	(102,9)		0,058	0,072	0,074	0,081	0,085	116,6	0,20
NL 3	49,4	64,2	77,7	92,0	110,8	(124,9)		0,072	0,089	0,094	0,102	0,110 ⁺	110,8	0,11
NL 4	22,4	38,6	57,9	70,9	94,2	112,1		0,126	0,143	Spaltbruch nach 8,4 min. Dauerlast			112,1	0,15
NL 5	10,3	33,2	50,7	70,4	93,3	107,6		0,124	0,156	0,163	0,183	0,196	152,5	0,44
NL 6	44,0	61,0	76,7	92,8	117,1	127,8	138,1	mit stetig steigender Kraft bis zum Bruch belastet					138,1	0,20
\bar{x}	33,5	49,7	63,9	78,3	98,3	112,4							127,0	0,24
v (%)	44	25	17	14	13	10								

+ Spaltbruch unter Dauerlast (nach 60 min.)

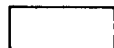
Der Dauerlast entsprechende Verbundspannung

Ergebnisse der Ausziehversuche

Tab. 12: Beton LB 300 - Mischung E 3 ($\beta_{w28} = 312 \text{ kp/cm}^2$, $\beta_{z28} = 16,6 \text{ kp/cm}^2$)

Lage zur Betonierriechung: normal liegend (NL)

Körper E 3-	τ_v -Spannungen in kp/cm^2 bei Δ in mm							Gesamtschlupf Δ_t in mm unter der Dauerlast nach t Min.					$\tau_{v,\max}$ kp/cm^2	Δ_{\max} mm
	0,001	0,005	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0'	5'	10'	30'	60'		
NL 1	35,0	44,0	58,8	69,5	85,2	99,6	96,4	mit stetig steigender Kraft bis zum Bruch belastet					160,1	0,66
NL 2	35,0	49,3	59,2	67,3	77,6	92,0	116,6						136,3	0,34
NL 3	10,3	36,3	53,8	69,5	91,1	105,4		0,122	0,149	0,156	Spaltbr. nach 12,5 min.		105,4	0,16
NL 4	49,3	60,6	69,5	79,8	92,0	(107,1)		0,064	0,083	0,088	0,099	0,106	170,5	1,64
NL 5	15,7	37,2	49,4	60,6	79,4	96,9	120,2	mit stetig steigender Kraft					160,1	0,60
NL 6	43,5	55,2	63,3	71,8	85,2	100,5	122,4	bis zum Bruch belastet					157,9	0,55
\bar{x}	31,5	47,8	59,0	69,8	85,1	100,2	113,9						148,4	0,66
v (%)	49	20	12	9,0	6,9	5,5	10							



Der Dauerlast entsprechende Verbundspannung

Ergebnisse der Ausziehversuche

Tab. 13: Normalbeton - Mischung N 1 ($\beta_{w16} = 280 \text{ kp/cm}^2$, $\beta_{z16} = 20,8 \text{ kp/cm}^2$)

Lage zur Betonierichtung: stehend - gegen (G)

Körper N1-	τ_v -Spannungen in kp/cm^2 bei Δ in mm							Gesamtschlupf Δ_t in mm unter der Dauerlast nach t Min.					$\tau_{v,\max}$	Δ_{\max}
	0,001	0,005	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0'	5'	10'	30'	60'		
G 1	29,6	39,5	48,5	61,9	89,3	114,4	139,9	mit stetig steigender Kraft bis zur Höchstlast belastet					>228,7	>1,30
G 2	26,9	50,2	70,4	81,6	114,4	(135,7)		0,055	0,062	0,064	0,067	0,070	>224,2	>0,94
G 3	33,7	55,2	67,3	87,5	128,0	138,1		0,128	0,147	0,154	0,170	0,179	>224,2	>1,50
G 4	34,1	54,7	69,1	88,4	116,6	133,2		0,118	0,139	0,146	0,160	0,170	>218,0	>2,00
G 5	27,8	49,8	62,4	80,3	112,1	(133,4)		0,062	0,075	0,078	0,083	0,087	216,6	0,90 ⁺
G 6	47,1	56,1	65,0	79,4	105,4	128,7	155,6	mit stetig steigender Kraft bis zur Höchstlast belastet					>228,7	>1,80
\bar{x}	33,2	50,9	63,8	79,8	111,0	130,6							>223,6	>1,41
v (%)	22	12	12	12	12,0	6,5								

+ Spaltbruch

 Der Dauerlast entsprechende Verbundspannung

$$\beta_v(0,05) = 0,57$$

$$\beta_v(0,1) = 0,745$$

Ergebnisse der Ausziehversuche

Tab. 14: Normalbeton - Mischung N 2 ($\beta_{w26} = 530 \text{ kp/cm}^2$, $\beta_{z26} = 34,0 \text{ kp/cm}^2$)

Lage zur Betonierichtung: stehend - gegen (G)

Körper N2-	τ_v -Spannungen in kp/cm^2 bei Δ in mm							Gesamtschlupf Δ_t in mm unter der Dauerlast nach t Min.					$\tau_{v,\max}$	Δ_{\max}
	0,001	0,005	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0'	5'	10'	30'	60'	kp/cm^2	mm
G 1	65,5	96,0	116,6	144,4	180,7	204,1	224,0	mit stetig steigender Kraft bis zur Höchstlast belastet					>224,2	>0,20
G 2	61,5	107,2	144,0	177,6	202,7	217,5		0,170	0,245	0,273	0,324	0,363	>224,2	>0,40
G 3	102,3	132,3	152,9	177,2	201,8	(217,1)		0,077	0,106	0,119	0,150	0,177	>224,2	>0,50
G 4	89,7	139,0	164,6	191,1	216,6	224,2		0,150	0,385	0,405	0,455	0,495	>224,2	>0,50
G 5	80,7	105,4	124,7	150,7	183,4	202,3		0,335+					>224,2	>0,40
G 6	44,9	100,9	145,3	183,0	212,1	224,2	>224,2	mit stetig steigender Kraft bis zur Höchstlast belastet					>224,2	>0,10
\bar{x}	74,1	113,5	141,4	170,6	199,6	212,7							>224,2	>0,35
v (%)	28	16	13	11	7,4	5								

+ Die Dauerlast wurde erst nach 8 Wiederholungen der Belastung aufgebracht.

$$f_v(0,05) = 2,54$$

$$f_v(0,1) = 2,86$$

Der Dauerlast entsprechende Verbundspannung

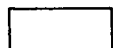
Ergebnisse der Ausziehversuche

Tab. 15: Normalbeton - Mischung N 3 ($\beta_{w14} = 374 \text{ kp/cm}^2$, $\beta_{z14} = 26,8 \text{ kp/cm}^2$)

Lage zur Betonierichtung: stehend - gegen (G)

Körper N3-	τ_v -Spannungen in kp/cm^2 bei Δ in mm							Gesamtschlupf Δ_t in mm unter der Dauerlast nach t Min.					$\tau_{v,\max}$ kp/cm ²	Δ_{\max} mm
	0,001	0,005	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0'	5'	10'	30'	60'		
G 1	60,1	80,7	92,8	114,4	131,9	148,0	165,0	mit stetig steigender Kraft bis zum Bruch belastet					225,6	1,48 ⁺
G 2	78,5	98,7	113,0	129,6	146,7	163,3		0,148	0,195	0,214	0,250	0,279	225,1	1,67 ⁺
G 3	55,6	87,9	109,4	131,4	155,6	(171,0)		0,074	0,102	0,111	0,132	0,149	>232,2	>1,20
G 4	35,9	70,9	89,7	103,6	122,4	(137,8)		0,063	0,075	0,080	0,089	0,096	>233,2	>2,00
G 5	36,8	74,9	98,2	118,0	138,6	152,9		0,132	0,177	0,194	0,234	0,263	219,3	2,00 ⁺
G 6	94,2	109,9	121,2	135,0	151,6	165,9	181,2	mit stetig steigender Kraft bis zum Bruch belastet					223,3	1,08 ⁺
\bar{x}	60,2	87,1	104,9	122,0	141,1	156,5							>226,6	>1,57
v (%)	38	17	11	9,9	8,9	8,0								

+ Spaltbruch



Der Dauerlast entsprechende Verbundspannung

$$f_v(0,05) = 1,45$$

$$f_v(0,1) = 1,71$$

Ergebnisse der Ausziehversuche

Tab. 16: Normalbeton - Mischung N 1 ($B_{w16} = 280 \text{ kp/cm}^2$, $B_{z16} = 20,8 \text{ kp/cm}^2$)

Lage zur Betonierriechung: normal liegend (NL)

Körper N1-	τ_v -Spannungen in kp/cm^2 bei Δ in mm							Gesamtschlupf Δ_t in mm unter der Dauerlast nach t Min.					$\tau_{v,max}$ kp/cm^2	Δ_{max} mm
	0,001	0,005	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0'	5'	10'	30'	60'		
NL 1	18,0	30,5	32,8	38,6	53,4	70,4	91,1	mit stetig steigender Kraft bis zum Schlupf $\Delta = 2,00 \text{ mm}$ belastet					>194,0	>2,00
NL 2	22,4	36,8	39,0	45,8	62,8	(79,3)		0,057	0,066	0,068	0,071	0,074	>186,0	>2,00
NL 3	24,7	33,2	35,9	43,5	59,2	76,3		0,112	0,132	0,137	0,145	0,150	>178,5	>2,00
NL 4	27,4	44,9	49,4	57,9	75,8	91,5		0,118	0,136	0,140	0,150	0,157	>210,0	>2,00
NL 5	34,1	36,8	39,9	46,7	65,0	(81,5)		0,056	0,068	0,070	0,074	0,076	>210,0	>2,00
NL 6	26,9	27,8	30,5	36,8	52,0	68,2	84,3	mit stetig steigender Kraft bis zum Bruch belastet					171,0	1,33 ⁺
\bar{x}	25,6	34,9	37,9	44,9	61,9	77,9							>191,6	>1,89
v (%)	21	17	17	17	14	11								

+ Spaltbruch

Der Dauerlast entsprechende Verbundspannung

$$f_v(0,05) = 0,5$$

$$f_v(0,1) = 0,51$$

Ergebnisse der Ausziehversuche

Tab. 17: Normalbeton - Mischung N 2 ($\beta_{w26} = 530 \text{ kp/cm}^2$, $\beta_{z26} = 34,0 \text{ kp/cm}^2$)

Lage zur Betonierriechung: normal liegend (NL)

Körper N2-	τ_v -Spannungen in kp/cm^2 bei Δ in mm							Gesamtschlupf Δ_t in mm unter der Dauerlast nach t Min.					$\tau_{v,\max}$ kp/cm^2	Δ_{\max} mm
	0,001	0,005	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0'	5'	10'	30'	60'		
NL 1			Körper beschädigt											
NL 2	69,5	86,5	102,7	120,2	152,0	176,7		0,130	0,180	0,200	0,230	0,255	>224,2	>0,45
NL 3	70,9	95,7	94,2	104,5	131,0	156,2		0,059	0,076	0,081	0,091	0,101	>224,2	>0,46
NL 4	71,8	90,2	103,6	120,2	145,8	171,0		0,066	0,087	0,094	0,112	0,118	>224,2	>0,46
NL 5	39,5	74,9	94,6	117,1	145,3	169,1		0,125	0,157	0,168	0,188	0,210	>224,2	>0,41
NL 6	50,2	66,4	74,9	89,7	119,3	146,7	174,0	mit stetig steigender Kraft bis zur Höchstlast belastet					>224,2	>0,51
\bar{x}	60,3	80,7	94,0	110,3	138,7	163,9							>224,2	>0,46
v (%)	24	12	12	12	9,6	7,5								

Der Dauerlast entsprechende Verbundspannung

$$f_v(0,05) = 1,19$$

$$f_v(0,1) = 1,32$$

Ergebnisse der Ausziehversuche

Tab. 18: Normalbeton - Mischung N 3 ($\beta_{w14} = 374 \text{ kp/cm}^2$, $\beta_{z14} = 26,8 \text{ kp/cm}^2$)

Lage zur Betonierichtung: normal liegend (NL)

Körper N3-	τ_v -Spannungen in kp/cm^2 bei Δ in mm							Gesamtschlupf Δ_t in mm unter der Dauerlast nach t Min.					$\tau_{v,\text{max}}$	Δ_{max}
	0,001	0,005	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0'	5'	10'	30'	60'	kp/cm^2	mm
NL 1	31,8	51,6	62,8	71,3	87,0	105,4	127,6	mit stetig steigender Kraft bis zum Schlupf $\Delta = 2,0$ mm belastet					>197,3	>2,00
NL 2	27,4	52,9	59,7	67,7	81,6	(97,1)		0,061	0,088	0,094	0,107	0,118	>209,0	>2,00
NL 3	52,5	56,1	60,1	68,2	82,1	97,3		0,127	0,163	0,174	0,195	0,214	>203,2	>2,00
NL 4	22,9	49,8	61,0	72,2	88,8	104,5		0,121	0,158	0,169	0,195	0,213	>209,9	>2,00
NL 5	56,1	64,6	70,4	78,9	96,0	(111,5)		0,061	0,084	0,090	0,104	0,116	>204,5	>2,00
NL 6	54,3	61,9	67,7	74,9	85,2	97,8	103,0	mit stetig steigender Kraft bis zum Schlupf $\Delta = 2,0$ mm belastet					>212,6	>2,00
\bar{x}	40,8	56,2	63,6	72,2	86,8	102,3							>206,1	>2,0
v (%)	37	11	7,0	5,9	6,1	5,7								

Der Dauerlast entsprechende Verbundspannung

$$R(0,0) = 1,34$$

$$R(0,1) = 1,14$$

Ergebnisse der Ausziehversuche

Tab. 19: Beton LB 300 - Mischung E 1 ($\beta_{w28} = 296 \text{ kp/cm}^2$, $\beta_{z28} = 16,1 \text{ kp/cm}^2$)

Höhenlage beim Betonieren: oben liegend (OL) und unten liegend (UL)

Körper E1-	τ_v -Spannungen in kp/cm^2 bei Δ in mm							$\tau_{v,\max}$	Δ_{\max}
	0,001	0,005	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	kp/cm^2	mm
OL 1	15,7	43,5	60,6	68,6	77,6	87,9	109,0	102,3	0,215
OL 2	14,4	32,8	44,9	52,5	62,8	72,2	82,1	86,6	0,280
OL 3	47,1	50,2	52,5	55,6	63,3			68,2	0,080
\bar{x}	25,7	42,2	52,6	58,9	67,8	80,1	91,5	85,7	0,192
UL 1	52,5	64,2	71,8	78,1				78,1	0,025
UL 2	37,2	52,5	61,5	69,5	80,7			87,4	0,088
UL 3	11,2	35,9	56,5	67,2				67,7	0,020
\bar{x}	33,7	50,8	63,3	71,8				77,9	0,045

Ergebnisse der Ausziehversuche

Tab. 20: Beton LB 300 - Mischung E 2 ($\beta_{w28} = 316 \text{ kp/cm}^2$, $\beta_{z28} = 14,8 \text{ kp/cm}^2$)

Höhenlage beim Betonieren: oben liegend (OL) und unten liegend (UL)

Körper E 2 -	τ_v -Spannungen in kp/cm^2 bei Δ in mm							$\tau_{v,\max}$ kp/cm^2	Δ_{\max} mm
	0,001	0,005	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2		
OL 1	47,7	50,3	55,2					62,8	0,015
OL 2	29,2	39,1	42,7	50,3	63,8			75,5	0,095
OL 3	27,9	43,6	50,3	54,8				58,4	0,030
\bar{x}	33,3	44,3	49,4	52,6				65,6	0,047
UL 1	32,3	48,1	58,4	67,4				68,7	0,025
UL 2	29,2	49,4	62,0					65,1	0,015
UL 3	31,4	50,7	63,4	66,9				67,4	0,024
\bar{x}	31,0	49,4	61,3	67,1				67,1	0,021

Ergebnisse der Ausziehversuche

Tab. 21: Beton LB 300 - Mischung E 3 ($\beta_{w28} = 312 \text{ kp/cm}^2$, $\beta_{z28} = 16,6 \text{ kp/cm}^2$)

Höhenlage beim Betonieren: oben liegend (OL) und unten liegend (UL)

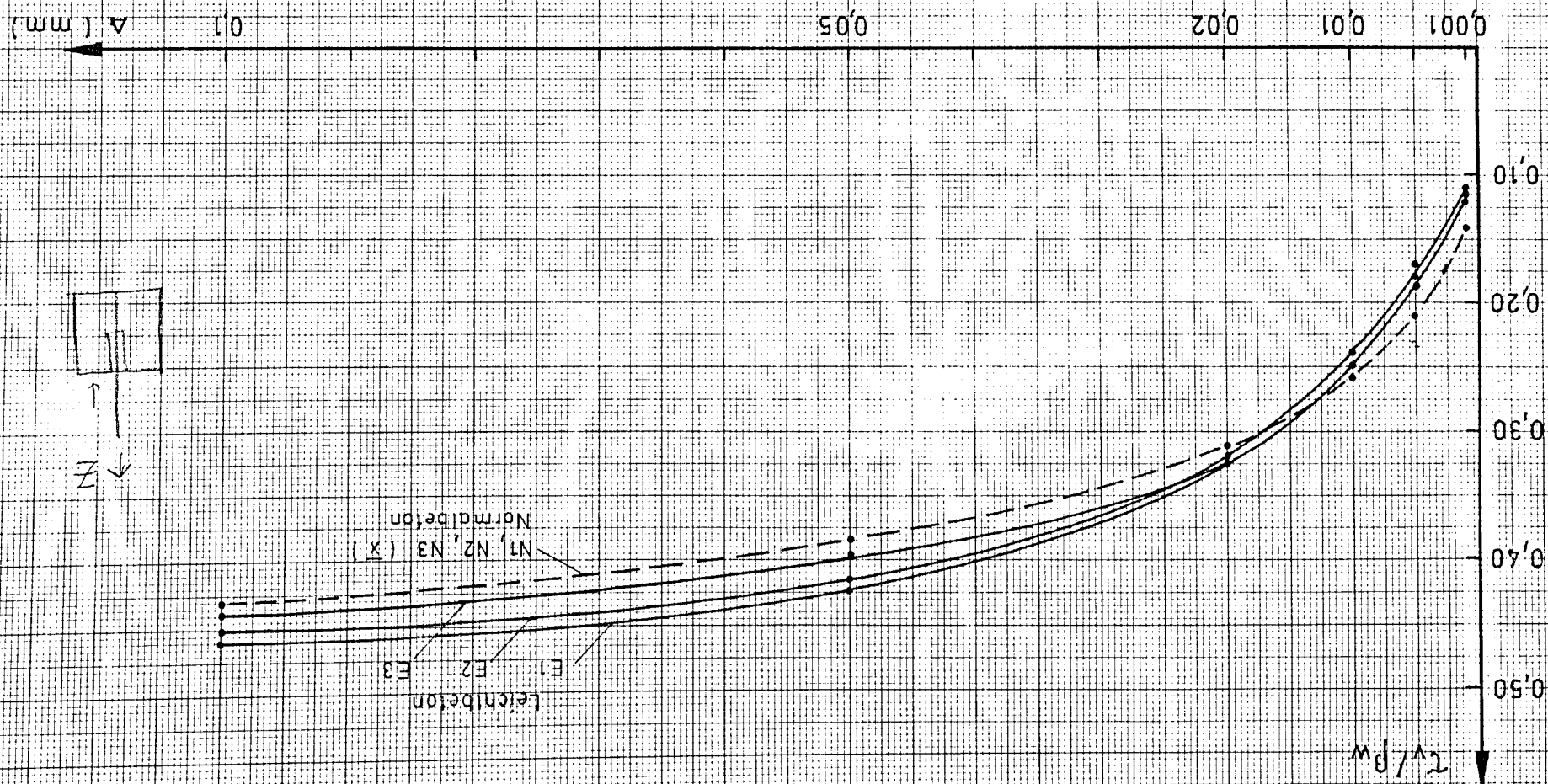
Körper E3-	τ_v -Spannungen in kp/cm^2 bei Δ in mm							$\tau_{v,\max}$ kp/cm^2	Δ_{\max} mm
	0,001	0,005	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2		
OL 1	4,5	15,7	18,9	23,4	34,2	44,0	59,9	69,6	0,280
OL 2	11,3	18,9	21,1	27,0	37,3	46,3	64,7	91,3	0,380
OL 3	12,6	23,4	27,0	32,3	40,5	47,2	64,7	98,0	0,500
\bar{x}	9,5	19,3	22,3	27,6	39,0	45,9	63,1	86,3	0,387
UL 1	20,2	47,2	68,4	82,7				88,5	0,027
UL 2	14,9	35,1	41,4	49,4	64,8	79,5		92,2	0,160
UL 3	52,5	70,0	80,0	88,5				89,0	0,030
\bar{x}	29,2	50,8	63,3	74,0				89,9	0,072

Ergebnisse der Ausziehversuche

Tab. 22: Normalbeton - Mischung N 2 ($\beta_{w26} = 530 \text{ kp/cm}^2$, $\beta_{z26} = 34,0 \text{ kp/cm}^2$)
Höhenlage beim Betonieren: oben liegend (OL) und unten liegend (UL)

Körper N2-	τ_v -Spannungen in kp/cm^2 bei Δ in mm							$\tau_{v,\max}$ kp/cm^2	Δ_{\max} mm
	0,001	0,005	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2		
OL 1	73,1	92,0	105,4	120,2	143,5	163,7	178,5	190,6	0,330
OL 2	83,0	105,0	115,7	126,8	148,9	167,3	182,1	185,2	0,260
OL 3	64,6	75,3	86,1	97,8	116,2	132,3	150,2	152,0	0,300
\bar{x}	73,6	90,8	102,4	115,0	136,2	154,4	170,3	177,6	0,297
UL 1	86,6	105,4	119,3	135,4	156,1	175,9		174,5	0,120
UL 2	59,7	87,5	102,3	117,3	144,9	169,1		177,2	0,130
UL 3	80,3	104,1	118,0	135,0	157,0			161,0	0,060
\bar{x}	75,5	99,0	113,2	129,2	152,6	170,0		170,9	0,103

Bild 1: Lage: stehend gegen (G)



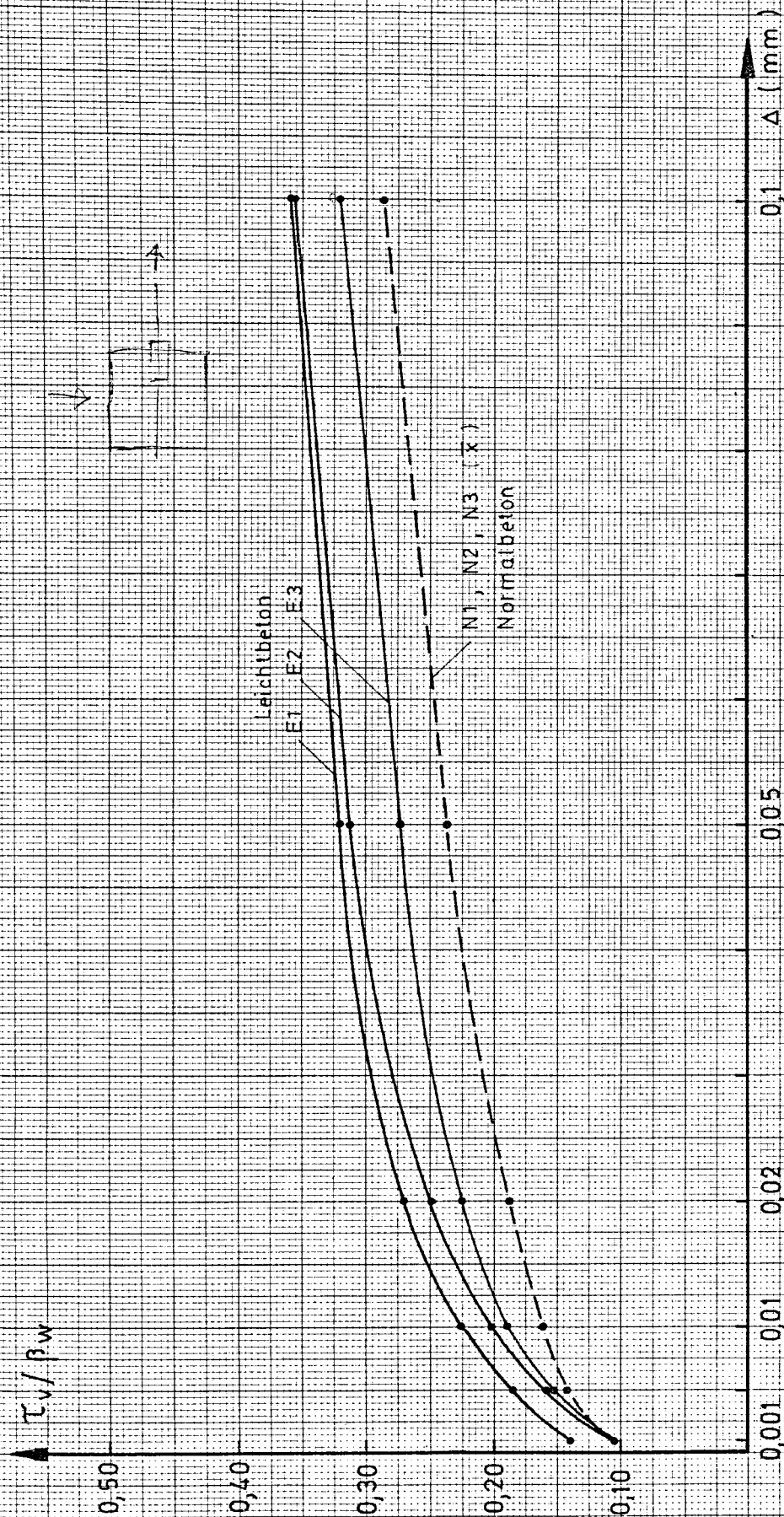


Bild 2: Lage: normal liegend (NL)

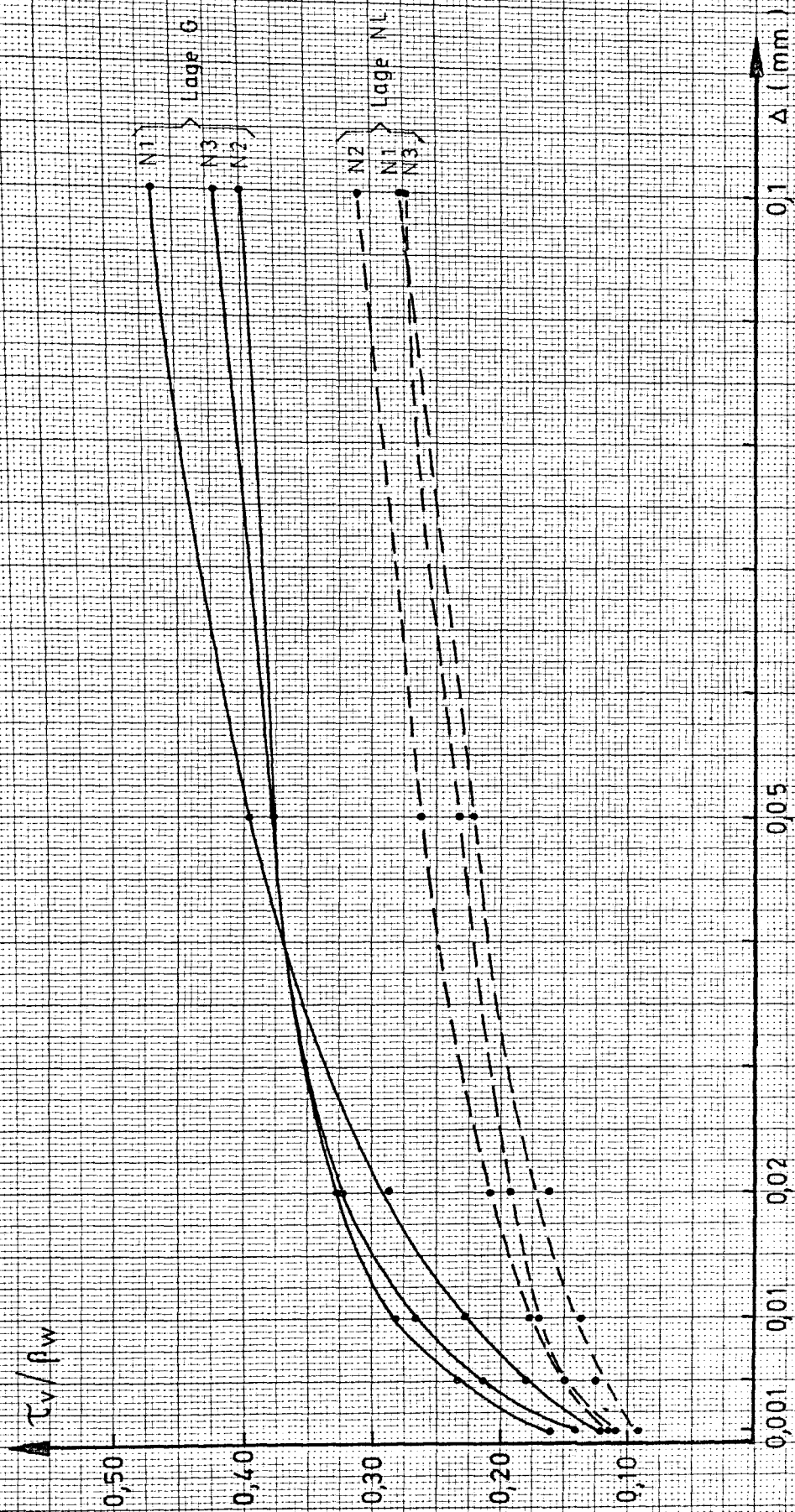


Bild 3: Normalbeton

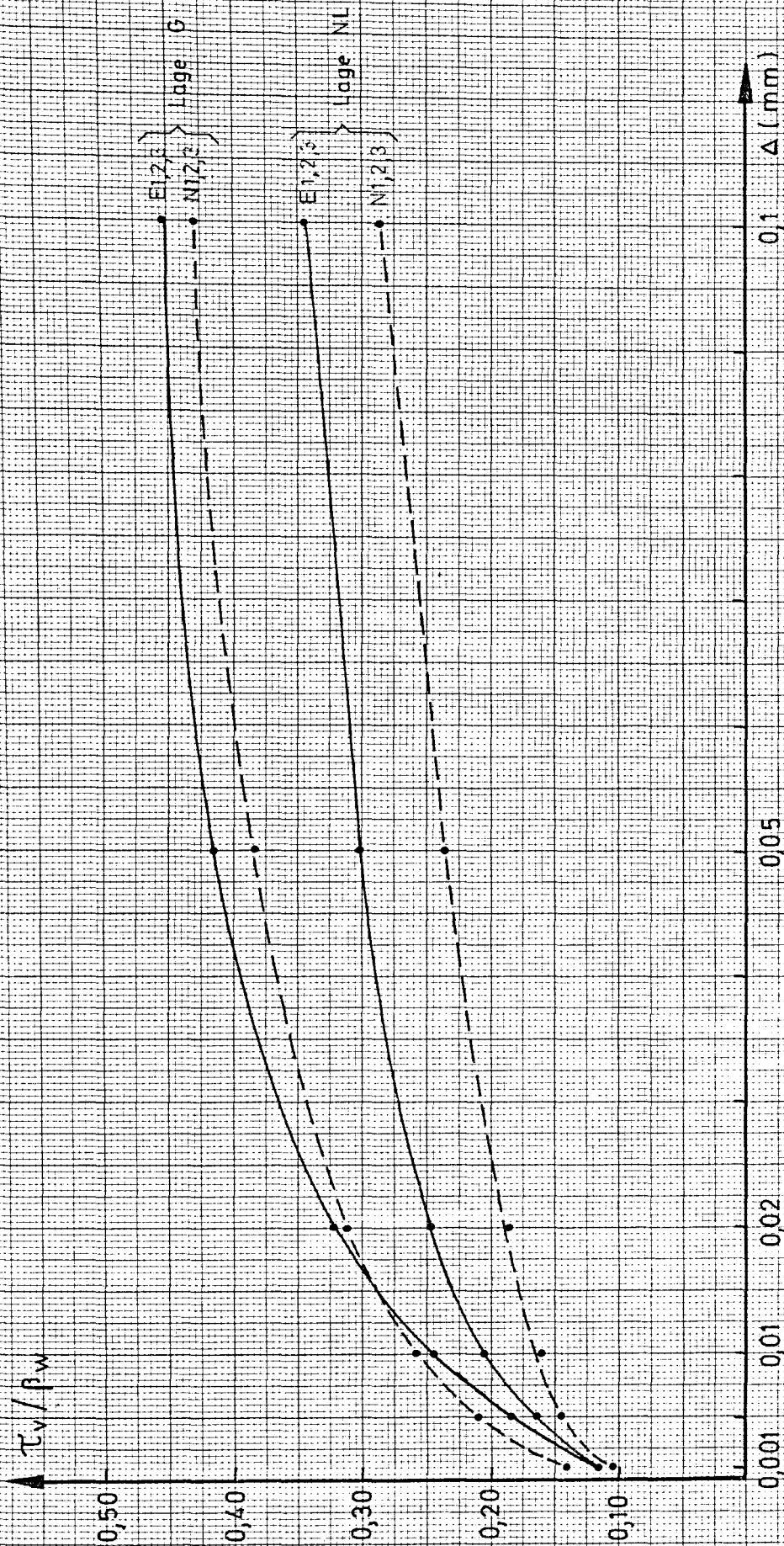


Bild 4: Vergleich des Normalbetons (N) mit Leichtbeton (E)

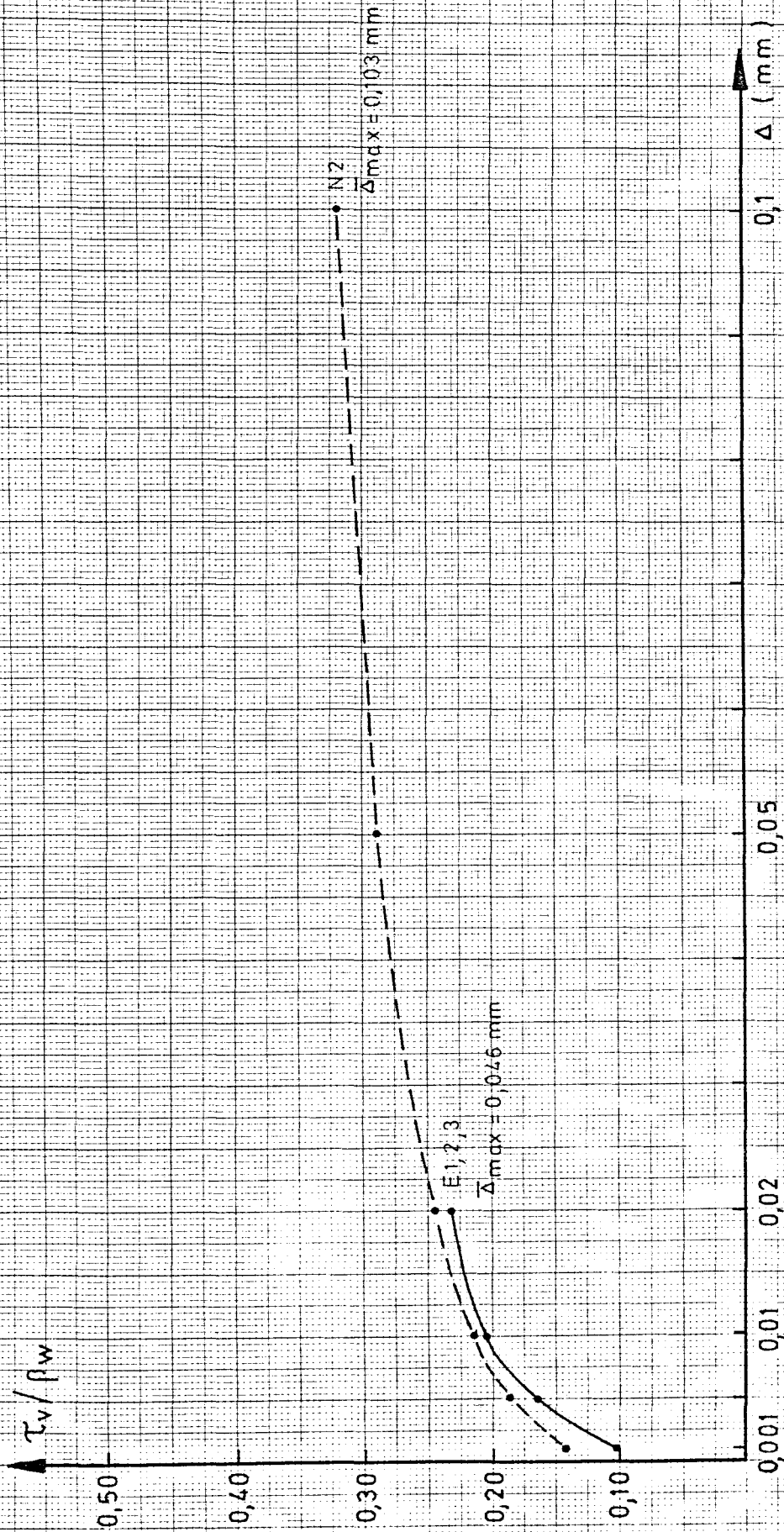


Bild 5: Vergleich des Normalbetons (N) mit Leichtbeton (E) für die Lage: untenliegend (UL)



Bild 6: Vergleich des Normalbetons (N) mit Leichtbeton (E) für die Lage: obenliegend (OL)

09. APRIL 1990

66-0507/001